

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Studijní program **M 2301** Strojní inženýrství

Studijní obor **2303T002** Strojírenská technologie

Zaměření

Strojírenská metalurgie

**SLEDOVÁNÍ BRŽDĚNÉHO SMRŠTĚNÍ TUHNOUCÍCH ODLITKŮ ZE
SLITIN ZINKU A HLINÍKU**

**MONITORING OF THE BRACED SHRINKAGE COOLING CASTINGS
FROM ZINC AND ALUMINIUM**

Pavel Pěnička

KSP – SM –

Vedoucí dipl. práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Stanislava Krýslová

Vedoucí katedry: Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 68

Počet tabulek: 8

Počet obrázků: 44

Počet příloh: 0

23.5. 2008

Stránka pro originál zadání dipl.práce

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá dilatací při tuhnutí odlitku. Bylo použito speciální měřící zařízení, které umožňuje sledování hodnot dilatace a teploty odlitku při tuhnutí slitiny zinku a hliníku. Tyto hodnoty byly pomocí registrační jednotky změřeny a zaznamenány do počítače. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek a dané souvislosti vyneseny do grafů. Další částí této práce bylo vyhodnocení daných závislostí vynesných do grafů. V závěru diplomové práce jsou uvedeny výpočty součinitele teplotní smrštivosti odlitku.

Abstract:

The diploma work is concerning dilatation during the castings solidification. Special measuring equipment has been used for this experiment, which has enabled to follow the values of dilatation and the temperatures during the solidification of zinc and aluminium alloys. These values have been measured by a registration unit and recorded into a computer. The measured values have been recorded in charts and following dependences have been demonstrated in graphs. Other part of the work was evaluation of given dependences from graphs. At the end of the diploma work there is the calculations of contraction coefficient.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Želechách 23. 5. 2008

.....
Pavel Pěnička
Lomnice nad Popelkou 512 51
Želechy 28

Poděkování:

Děkuji prof. Ing. Ivě Nové, CSc. , Ing. et. Bc. Stanislavě Kryslové a slévačskému mistrovi panu Drahoslavu Vinšovi za pomoc při tvorbě diplomové práce.

O B S A H

1.	ÚVOD.....	8
2.	REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE.....	10
	2.1 Hliník a jeho slitiny.....	10
	2.1.1 Charakteristika čistého hliníku.....	10
	2.1.2 Charakteristika slévárenských slitin hliníku.....	13
	2.1.3 Charakteristika slévárenských slitin zinku.....	19
	2.2 Rozměrové změny při tuhnutí odlitků.....	27
	2.2.1 Objemové změny.....	28
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	36
	3.1 Charakteristika měřicího zařízení.....	36
	3.2 Příprava taveniny a zkušebního zařízení pro odlévání.....	38
	3.3 Postup prováděných experimentů.....	40
	3.4 Vyhodnocení naměřených závislostí.....	54
4.	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	61
5.	ZÁVĚR.....	64
6.	POUŽITÁ LITERATURA.....	66

Seznam zkratek a symbolů

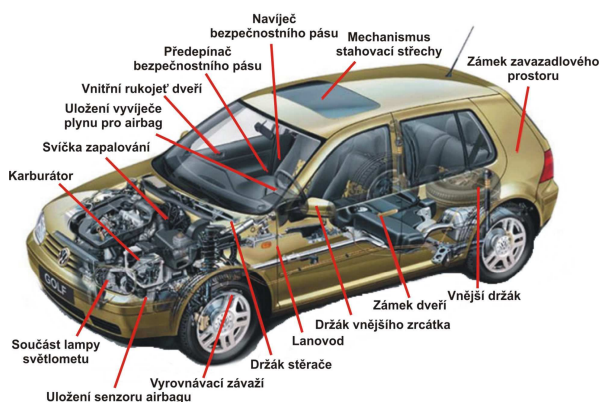
c	Měrná tepelná kapacita, $[\text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
R_m	Mez pevnosti, $[\text{MPa}]$
φ	Tažnost, $[\%]$
λ_F	Součinitel tepelné vodivosti, $[\text{W/m.K}]$
M_m	Molární hmotnost $[\text{Kg/kmol}]$
l_t	Měrné teplo $[\text{J/kg}]$
p	Tlak, $[\text{Pa}]$
S	Plocha, $[\text{m}^2]$,
t	Čas, $[\text{s}]$
T	Absolutní teplota, $[\text{K}]$
T_F	Teplota formy, $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
T_L	Teplota likvidu $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
$T_{\text{lití}}$	Teplota lití, $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
T_S	Teplota solidu, $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
$T_{z.l.s}$	Teplota začátku lineárního smrštění, $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
V	Objem, $[\text{m}^3]$
V_0	Počáteční objem, $[\text{m}^3]$
T_{tav}	Teplota tavení $[\text{°C}]$
T_{var}	Teplota varu $[\text{°C}]$
ΔT	Teplotní změna, $[\text{K}]$
ΔV	Objemová změna, $[\text{m}^3]$
α	Součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) $[\text{K}^{-1}]$
l_0	Délka „piškoty“ $[\text{mm}]$
Δl	Změna lineárního rozměru sledovaného tělesa $[\text{mm}]$
ρ	Hustota, $[\text{kg.m}^{-3}]$
ρ_F	Hustota materiálu formy, $[\text{kg.m}^{-3}]$
l_v	rozměr odlitku po volné dilataci, $[\text{m}]$
l_z	Počáteční rozměr odlitku při teplotě, $T_{z.l.s}$ $[\text{m}]$
T_{kr}	Teplota krystalizace $[\text{°C}]$, $[\text{K}]$
T_O	Teplota okolí, $[\text{K}]$
T_{op}	Teplotu okolního prostředí, $[\text{K}]$
V_d	Objem dendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$
V_{md}	Objem mezidendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$
V_{st}	Objem soustředné staženiny, $[\text{m}^3]$
V_{vd}	Objem vnitrodendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$
ΔV_L	Objemová změna odlitku v kapalném stavu, $[\text{m}^3]$
ΔV_{L-S}	Objemová změna mezi teplotami T_L a T_S , $[\text{m}^3]$
γ	Součinitel objemového smrštění, $[\text{K}^{-1}]$
γ_S	průměrná hodnota γ v teplotním intervalu $T_L - T_S$, $[\text{K}^{-1}]$
δ	Šířka pórovitého pásma odlitku, $[\text{m}]$
ε_V	Poměrná volná dilatace, $[-]$
ε_B	bržděná tepelná dilatace, $[-]$

1. ÚVOD

V současné době se v průmyslové praxi čím dál více uplatňují slitiny neželezných kovů, především hliníku, hořčíku a zinku, popř. mědi, titanu atd. Zejména pokud se jedná o automobilový průmysl, tak se využívají dominantní vlastnosti slitin hliníku a zinku. U slitin hliníku to je poměrně malá hustota (2700 kg.m^{-3}), vysoká tepelná vodivost ($207 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) i dobré slévárenské vlastnosti. Slitiny zinku vykazují nízkou teplotu tavení (méně než $420 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a nenáročné odlévání. Hlavními technologiemi odlévání obou těchto materiálů a jejich slitin je vysokotlaký způsob. Tato technologie zabezpečuje vysokou rozměrovou přesnost a hladkost odlitků. Při gravitačním lití do kovových forem odlitky ze slitin hliníku vykazují hutnost bez vnitřních vad (písty a hlavy spalovacích motorů). Hlavní výhodou, proč slitiny hliníku našly značné uplatnění v automobilovém průmyslu je nízká hustota a vysoká tepelná vodivost. Odlitky mají též výborné mechanické vlastnosti. Slitiny zinku se vyznačují výbornými slévárenskými vlastnostmi a v současné době jejich použití je při výrobě drobných odlitků v automobilovém průmyslu.



Obr. 1-1 Ukázky odlitků ze slitin hliníku



Obr. 1 – 2 Automobil s vyznačením odlitků ze slitin zinku

Problematikou výroby odlitků se již řadu let zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie, TU v Liberci, kteří v současné době řeší v rámci výzkumného záměru MSM 4674788501 vlastnosti slitin hliníku a zinku s ohledem na zjišťování časových závislostí probíhajících dilatačních změn při tuhnutí odlitků. Výsledkem jejich práce je zjišťování a zpřesňování charakteristiky průběhu těchto změn.

Na řešení této problematiky je též zaměřena má diplomová práce, která je řešena na tomto pracovišti. Téma mé diplomové práce bylo sledování smršťování tuhnoucích odlitků ze slitin hliníku i zinku. V rámci tohoto řešení byl proveden výpočet součinitele tepelné smrštivosti materiálu odlitku při jeho volném smršťování.

Tato diplomová práce vznikla s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501

2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Hliník a jeho slitiny

2.1.1 Charakteristika čistého hliníku

Základní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit. Bauxit-hydratovaný oxid hlinitý, s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, v němž obsah Al_2O_3 bývá kolem 50%. Hliník z Bauxitu dostaneme elektrolýzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech. Celý proces je složitý a skládá se ze dvou etap:

- 1) výroba oxidu hlinitého z hlinitanových rud;
- 2) redukce oxidu na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu

Fyzikální vlastnosti čistého hliníku jsou:

- a) hustota $2700 \text{ [kg.m}^3\text{]}$
- b) teplota tání $660 \text{ }^\circ\text{C}$
- c) teplota vypařování $2520 \text{ }^\circ\text{C}$
- d) krystalická mřížka, kubická plošně centrovaná
- e) mřížková konstanta $a = 4,05 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- f) atomové číslo 13
- g) atomová hmotnost 26,98

Největší fyzikální vlastnosti hliníku jsou tedy ve vysoké tepelné a také elektrické vodivosti. Můžeme tedy říci, že tepelná vodivost hliníku při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ obsahuje kolem $235 \text{ [W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$. Dále pak součinitel elektrické vodivosti hliníku s čistotou 99,99% (relativně) je při normálních teplotách tak kolem $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ [}\Omega \cdot \text{m}\text{]}$. To lze srovnat asi tak z 60% elektrické vodivosti mědi. Je nutné konstatovat že vlivem přísadových prvků se však výrazně snižuje součinitel tepelné roztažnosti za normálních teplot je asi tak $23 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$. Hliník tvoří s kyslíkem velmi stabilní oxid Al_2O_3 .

Tloušťka oxidické vrstvy na povrchu součásti za běžných podmínek bývá tak asi do 10nm. Oxidická vrstva brání hluboké oxidaci a zajišťuje odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Vše je velmi závislé na pH elektrolytu. V rozmezí pH 4,5-8,5 je chemická odolnost hliníku nejlepší, ovšem v zásaditém prostředí je omezená.

Mechanické vlastnosti u čistého hliníku jsou špatné. Pevnost v tahu je tak do 100 MPa, tvrdost 20 až 30 HB, plastické vlastnosti čistého hliníku jsou velmi dobré. Obecně platí že kovy s kubickou plošně centrovanou mřížkou s tažností nad 20%, jako konstrukční materiál je čistý hliník prakticky nepoužitelný. Mechanické vlastnosti lze zvýšit přidáním vhodného prvku jako např. křemíku, hořčíku, mědi atd.

Významná je poměrně vysoká měrná tepelná kapacita hliníku přibližně $0,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a vysoké skupenské teplo tání $396 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Problém je takový že energetická náročnost na roztavení hliníku je velmi vysoká.

Slévárenské vlastnosti čistého hliníku jsou pro výrobu odlitků nevyhovující, proto se v technické praxi používají jeho slitiny. Přísadové prvky zvyšují mechanické a zlepšují technologické vlastnosti. Výsledné vlastnosti slitin jsou dány množstvím a kombinací přísadových prvků. Musíme posoudit zda daná slitina se do prostředí ve kterém jí budeme provozovat hodí či nikoliv.

Slévárenské vlastnosti hliníku - velmi úzce souvisí se šířkou intervalu tuhnutí dané slitiny. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají slitiny s úzkým intervalem tuhnutí (chemické složení-čistý kov nebo k eutektickému složení). Slitiny se širším intervalem tuhnutí mají horší zabíhavost a mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a mikrostaženin. Jejich nalitkování je málo účinné. Důsledkem je netěsnost odlitků.

Zabíhavost – je schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu slévárenské formy. Pokud posuzujeme schopnosti odlévání slitiny je nutno rozlišovat zda jde o tekutost či zabíhavost. Tekutost je fyzikální vlastnost, je charakterizována viskozitou tekutého kovu a se zabíhavostí souvisí jen částečně. Zabíhavost je závislá na šířce intervalu tuhnutí dané slitiny. Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, jako jsou eutektické slitiny mají dobrou zabíhavost, naopak slitiny se širokým dvoufázovým pásmem zabíhavost výrazně snižují. Pokud zde máme oxidické vměstky v té tavenině, tak se nám zabíhavost výrazně snižuje. Na zabíhavostli se také uplatňuje vliv povrchového napětí, smáčivost formy, modifikace taveniny atd. Zabíhavost jako technologická vlastnost, která nám určuje, jak se mohou tenkostěnné odlitky odlévat a jak přesně bude kov kopírovat dutinu slévárenské formy.

Sklon ke vzniku staženin - je charakterizována objemovým úbytkem kovu během tuhnutí a tendenci ke vzniku soustředných (vnitřních nebo vnějších) staženin, nebo rozptýlených staženin a ředin. Slitiny, které mají sklon ke vzniku soustředných staženin lze dobře nálitkovat, také můžeme říci že mají dobrou těsnost. Takto tuhnou zejména slitiny, které mají eutektické složení. Slitiny se širokým intervalem tuhnutí (dvojfázovým) -sklon ke vzniku rozptýlených staženin a velmi složitě a obtížně se nálitkují. Lze tedy říci že mají horší těsnost.

Sklon k naplynění - je charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Některé prvky naplynění zvyšují a jiné snižují. Stav naplynění určuje kolik bublin plynových se nám objeví v odlitku.

Odolnost proti vzniku trhlin a prasklin - Můžeme tedy říci, že je to schopnost odolávat napětí, které vzniká vlivem smršťování v oblasti tuhnutí a během ochlazování. Této vlastnosti se využívá především u odlitku s nerovnoměrnými tloušťkami stěn (tvarově složité odlitky, nebo odlitky s tuhou konstrukcí) a také v případech kdy je smršťování bržděno tuhou formou.

Odlitek by měl také splňovat některé technologické vlastnosti a to především:

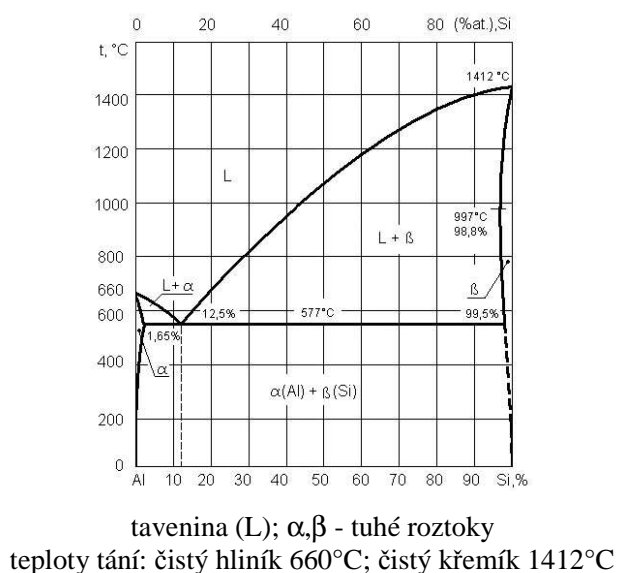
- a) být dobře obrobitelný
- b) musí odolávat povětrnostním podmínkám (korozi)
- c) měl by být dobře svařitelný
- d) také, aby šel dobře vyleštit
- e) hlavní důsledek se klade na to, aby byl nepropustný (brání pronikání tlakového média)

Mechanické vlastnosti - jsou závislé na vlastnostech základní kovové hmoty, na disperzitě strukturních složek, na přítomnosti a tvaru intermetalických fází a na tepelném zpracování. Můžeme konstatovat že jemnozrnná struktura jednoznačně zlepšuje všechny mechanické a také řadu technologických vlastností slitin. Při odlévání hliníkových slitin se především zabýváme tím, aby kov námi odlévaný se velmi rychle ochladil při tuhnutí - tím pádem nám nezhrubne zrna a docílíme tak jemnozrnné struktury. Z mechanických vlastností se sleduje mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a tvrdost a také index kvality.

Slitiny hliníku jsou v dnešní době značeny dle evropské normy ČSN EN 1706. Značí se buď číselně nebo chemickými značkami. Značení je ve tvaru: EN AC-XXXXX, kde první číslice značí přísadový prvek; 2: Al-Cu, 4:Al-Si, 5:Al-Mg, 7:Al-Zn.

2.1.2 Charakteristika slévárenských slitin hliníku

Nejvíce používanými slitinami hliníku jsou siluminy (binární slitiny Al-Si), které dle eutektického bodu dělíme na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Na obr. 2-1 je uveden rovnovážný diagram Al-Si. Tato binární slitina může obsahovat i další prvky, jejíž výskyt je nižší než 0,1%. Pokud chceme tuto slitinu použít v potravinářství a potřebujeme, aby byla korozivzdorná, tak zde použijeme 0,05% mědi. Pokud zde dodáme titan v množství 0,1 až 0,2% tím docílíme zjemnění zrna v primární fázi α (Al). Primární siluminy mají dobré slévárenské vlastnosti. Odlitky mají dobrou těsnost vůči plynům i kapalinám, také dobrou svařitelnost a odolnost vůči korozi. Ovšem obrobitelnost není zrovna nejlepší. Čím vyšší je obsah Si, tím lepší jsou slévárenské vlastnosti. Normalizované slitiny obsahují obvykle 10 až 13% Si. Tyto slitiny lze použít pro odlévání do pískových forem, kovových forem, tak i tlakové lití. Pokud máme vyšší obsah křemíku je dobré při gravitačním lití modifikovat buď sodíkem nebo stronciem.



Obr. 2-1 Rovnovážný diagram Al-Si (nemodifikovaná tavenina)



Obr. 2 – 2 Ukázky odlitků ze slitin hliníku s povrchovou úpravou

Slitiny Al-Si

Slitiny Al-Si-Cu - v současné době je v automobilovém průmyslu používána tato ternární slitina. Přítomnost Cu umožňuje její tepelné zpracování – vytvrzování. Tato slitina tvoří asi půlku z celkové produkce hliníkových odlitků. Tyto odlitky se po odlití dále nezpracovávají, ale režim ochlazování při jejich vyjmutí ze slévárenské formy, tj. následné ochlazení ve vodě vytváří podmínky vzniku přesyceného tuhého roztoku o vytvrditelnou fázi (Al_2Cu), která začne postupně ve struktuře odlitku precipitovat. O takto vyrobených odlitcích hovoříme jako o tepelně nezpracovaných. Proto musíme dát pozor na to, že díky přítomnosti mědi dochází po určitém období k samovolnému vytvrzování. Samotné vytvrzování je tím rychlejší, čím rychleji se odlitek ochlazoval při tuhnutí a tím vznikl více přesycený tuhý roztok α (Al). Samovolné vytvrzování obvykle probíhá po dobu několika dnů. Tyto slitiny se především hodí pro výrobu složitých odlitků v gravitačním odlévání do kovových forem a především pro lití pod tlakem. Nadeutektické slitiny se používají pro odlévání pístů spalovacích motorů, vydrží velké teploty, ale také tlaky. Dá se říci, že mají i velkou výdrž proti opotřebení.

Slitiny Al-Si-Mg - obsah hořčíku u těchto slitin bývá v množství 0,25 až 0,45% (u některých slitin až 0,7%), tento hořčík umožňuje provádět vytvrzování za tepla. Při běžné

rychlosti ochlazování se hořčík vylučuje ve slitině ve fázi Mg_2Si . V litém stavu mají tyto slitiny jen průměrné vlastnosti, velmi vysokých mechanických vlastností dosahují až po fázi vytvrzování. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické a dle obsahu křemíku se dělí do dvou typů Al-Si7-Mg a Al-Si10-Mg.

Slitiny s vyšším obsahem křemíku mají lepší slévárenské vlastnosti a rovněž také mají lepší svařitelnost. Obsah dalších doprovodných prvků je limitován na velmi nízké hodnoty podobně jako u skupiny Al-Si. Odlévání provádíme jak gravitačně tak i pod tlakem. Odléváme jak do pískových tak i kovových forem. Odlitky ze slitin Al-Si-Mg se používají pro vysoce namáhané součásti. Nejčastěji kde je můžeme vidět je především automobilový a letecký průmysl. Pokud tyto slitiny vytvrdíme dosáhneme velmi vysokých mechanických vlastností R_m , $R_{p0,2}$ a HB. Ale nesmíme opomenout, že díky vytvrzování se nám zmenšuje tažnost. Také se nám zvýší obrobiteľnosť to díky hořčíku. Dle grafu vidíme jak se hořčík projevuje na mechanické vlastnosti. Jedná se o vytvrzenou slitinu AlSi9, která byla odlita do pískové formy.

Slévárenské vlastnosti slitin typu AlSiMg a AlSiCu – s růstem obsahu křemíku až do eutektického složení docílíme tím toho, že interval tuhnutí se zmenšuje a tím pádem se zlepšují slévárenské vlastnosti. Především se také zlepšuje zabíhavost a zmenšuje se objem staženin. Výbornou předností je především to, že hliník při svém tuhnutí zvětšuje svůj objem a tím pádem kompenzuje stahování hliníkové matrice. Také se zmenšuje smrštění slitiny v intervalu mezi teplotou tuhnutí a normální teplotou.

Mechanické vlastnosti slitin hliníku, především pevnost v tahu, zvýšíme přísadami Cu a Mg. Odolnost slitin hliníku vůči korozi není příliš dobrá, ve vlhké atmosféře slitiny hliníku získávají šedé matné zabarvení. Povrchová úprava těchto slitin se provádí pokovováním. Leštiteľnosť slitin je uspokojivá. Přísada mědi ve slitinách Al-Si zmenšuje stahování kovu při tuhnutí a zlepšuje nepropustnosť odlitků. V různých sbírkách se uvádí, že se zmenšuje naplynění taveniny. Měď tvoří ve slitině ternární eutektikum, tuhne až v závěru tuhnutí. Pokud zde máme měď a hořčík, tak nám vznikají různá eutektika s teplotami tuhnutí až pod 500 °C.

Mechanické vlastnosti - Přísadami mědi zvýšíme pevnost a tvrdost, ale zase docílíme toho, že se nám sníží plastické vlastnosti. Tento vliv se dále zvětšuje za přítomnosti hořčíku a zinku.

Svoje konečné mechanické vlastnosti získávají odlitky až po několika dnech díky samovolnému vytvrzování.

Obrobitelnost - Díky mědi se velmi zlepšuje. Dosáhneme kvalitního povrchu díky tomu, že se třísky dobře lámou.

Odolnost vůči korozi - Udává se, že měď má negativní vliv na odolnost proti korozi v kyselinách a také v alkalických roztocích či mořské vodě. Většinou se doporučuje používat nějakých ochranných nátěrů, ale pro běžné automobilové použití těchto slitin vůči korozi je vyhovující.

Povrchová úprava - Vlivem mědi se zlepšuje kvalita povrchu po broušení a leštění. Pokud použijeme tak nad 0,5% mědi, tak zabráníme anodické oxidaci zmenšuje se tloušťka a hutnost ochranné vrstvy. Povrch je matný a má nestejnoseměrný vzhled. Pokud bychom chtěli zvýšit odolnost vůči otěru je však možno použít anodickou oxidaci.

Slitina Al-SiMg0,3 - odlévá se do pískových forem, nebo kovových forem gravitačně nebo nízkotlakým litím. Má malý sklon ke vzniku staženin. Je vhodné provádět zjemnění primárního zrna očkovaním přípravky na bázi Ti a B a modifikaci eutektika.

Al-Si10Mg - Slitiny tohoto typu jsou vhodné pro všechny technologie odlévání. Pokud odléváme do pískových forem je nutné provést modifikaci sodíkem i pokud odléváme do kovových forem, tak je modifikace také prospěšná. Velkou výhodou je, že při tuhnutí netvoří vnitřní staženiny.

Al-Si12 - Opět pro všechny technologie odlévání, odlévání probíhá do pískových tak i kovových forem. Gravitačně nebo pod nízkým tlakem. Nevýhodou je, že v silnějších stěnách vznikají staženiny. Pokud odléváme do pískových forem je třeba provést modifikaci sodíkem. Opět při odlévání do kovových forem je modifikace stronciem či sodíkem také vhodná, především u odlitků se značně rozdílnou tloušťkou stěn.

Al-Si5Cu - Odlévání především do kovových nebo pískových forem především gravitačně. Doporučuje se provádět očkování, při lití do pískových forem i modifikaci eutektika. Nevýhoda je taková, že má sklon ke vzniku trhlin. Čím bude více obsahu Si, tím nám vzniknou lepší slévárenské vlastnosti.

Slitiny Al-Cu

Charakteristické vlastnosti - mají vysokou pevnost za normální teploty, vysokou tažnost, houževnatost a tyto změny si uchovává za zvýšených teplot. Můžeme také říci, že mají výbornou obrobiteľnosť, špatnou odolnosť proti korozi a pouze podmínenou svařitelnosť.

Odlévání - jsou určeny pro gravitační lití do pískových forem, kovových forem či skořepinových forem. Nevýhodou je, že mají špatné slévárenské vlastnosti (sklon ke vzniku rozptýlených staženin, sklon k praskání). Slévárenské vlastnosti máme možnost zlepšit pokud přidáme očkovač. Tato slitina je velmi náchylná na kontaminaci křemíkem jehož obsah obvykle nepřesahuje 0,2%.

Teplné zpracování - Rozpouštěcí žíhání probíhá za teplot 530 °C asi po dobu 8 hodin. Ochlazování probíhá do teplé vody.

Použití - Používají se tam kde máme vysoké nároky na pevnost odlitků (převodové skříně, tam kde používáme zvýšené teploty (hlavy válců, turbíny, součásti přehřívačů...atd.)). Jelikož má tato slitina špatné slévárenské vlastnosti snažíme se abychom tuto slitinu převedli spíše na slitinu typu Al-Si.

Slitiny Al-Mg

Charakteristika - Slitiny s velmi dobrou odolností především proti mořské vodě a ve slabě alkalickém prostředí, s výbornou obrobiteľnosťí, leštitelností a možností povrchové úpravy eloxováním. Ale musíme dát pozor, že mechanické vlastnosti zde máme špatné. Čím vyšší bude teplota nad 100°C, tak tím se nám zhoršují mechanické vlastnosti.

Odlévání - Všechny tyto slitiny tohoto typu mají špatné slévárenské vlastnosti. Slitiny jsou především náchylné k tvorbě oxidů a také naplynění. Taveninu nesmíme přehřívat nad teplotu 750 °C. Pokud chceme odlévat musíme před tím pečlivě očistit hladinu odlévané taveniny a také musíme taveninu odplynit. Také zde nesmíme zapomenout na zjemnění zrna, neboť jinak má slitina po anodické oxidaci sklon ke vzniku povrchové vady („ledové květy“). Pokud máme slitiny s hrubým zrnem, tak nám vznikají trhliny. Také zde je sklon ke vzniku staženin a propadlin na povrchu odlitků. Máme zde velmi obtížné nálitkování, velmi krátké dosazovací vzdálenosti, nutnost použít vnějších chladítek.

Jelikož je zde sklon ke vzniku trhlín, je třeba volit teplotu kóvil co největší (doporučuje se používat tepelně - izolačních nátěrů). Lící teploty se snažíme mít co možná nejmenší. Pokud

možno tak v rozmezí 680 až 730 °C. Slitiny, které mají 3 až 5% Mg se odlévají gravitačně do pískových forem nebo kovových forem. Slitiny, které mají 9% Mg se odlévají tlakově.

Tepelné zpracování - tyto slitiny dle normy ČSN EN 1706 se používají ve stavu nezpracovaném. To díky jejich špatnému odlévání.

Použití - především pro dekorativní předměty, lodní kování, ozdobné díly aut, optické přístroje a také potravinářský a chemický průmysl.

Nadeutektické siluminy - jsou to takové siluminy, které obsahují více než 12,5% křemíku. Dříve se používaly siluminy do obsahu 14% křemíku a v dnešní době se používají siluminy i s obsahem 17 až 18% křemíku. S obsahem křemíku se výrazně rozšiřuje pásmo tuhnutí. Obsah, který je kolem 20% křemíku je výjimečný. Dalšími přísadovými prvky v nadeutektických siluminech jsou měď, hořčík, mangan a nikl. Podíl v celkovém rozsahu slitin Al-Si je poměrně nízký. Důvodem pro jejich používání je především vysoká tvrdost primárního křemíku, kterým těmto slitinám dodává vysokou odolnost proti opotřebení asi o 15% menší součinitel tepelné roztažnosti, než mají podeutektické slitiny. Slitiny mají celkem dobré mechanické vlastnosti, houževnatost je malá. Pokud bychom se bavili o slévárenských vlastnostech, u těchto slitin jsou dobré. Tyto slitiny se nejvíce používají v automobilovém průmyslu na výrobu pístů spalovacích motorů, hlavy válců, kompresory, pumpy a součásti brzdových systémů. Tato slitina má za výhodu především dlouhý interval tekutosti slitiny ve fázi tuhnutí. Je zde dobrá zabíhavost.

Nejpoužívanějším materiálem na trhu a výrobu bloků spalovacích motorů je nadeutektický silumin AlSi17Cu4Mg . Tato slitina se používá pro odlévání do pískových forem a pro odlévání do kovových forem ale gravitačně. Zde dosahujeme u této slitiny velkých mechanických vlastností, je zde malá tepelná roztažnost a velká tepelná vodivost. Těchto vlastností se využívá u tenkostěnných odlitků pro moderní motory s vysokými měrnými výkony.

Tabulka 2.1 Srovnání vlastností slitiny AlSi17Cu4 s podeutektickými slitinami

Vlastnost	AlSi9Cu3	AlSi9Cu3	AlSi6Cu4	AlSi6Cu4	AlSi17Cu4
	P/K	T	P/K	T	P/K
R_{p0,2}(MPa)	90-100	140	90-100	150	190-320
R_m(MPa)	150-170	240	150-170	220	220-360
Tažnost(%)	1	1	1	1	0,5
Tvrđost HB	60-75	80	60-75		90-150
Souč.Tepelné vodivosti(W/m.K)	100-110	100-110	110-120	110-120	117-134

Poznámka: P-lití do písku; K - lití gravitační do kovové formy; T-l ití tlakové

2.1.3 Charakteristika slévárenských slitin zinku

Ve slévárenství se zinek jako samostatný kov nepoužívá, ale používají se jeho slitiny, neboť zinek nevykazuje nejlepší mechanické vlastnosti a pro výrobu strojních součástí se nepoužívá. Těchto vlastností dosáhne až s příměsemi s ostatními kovy, jako např. s hliníkem a mědí. Zinek se řadí do skupiny těžkých neželezných kovů s nízkou tavicí teplotou (420 °C). Krystalizuje v hexagonální krystalické soustavě.

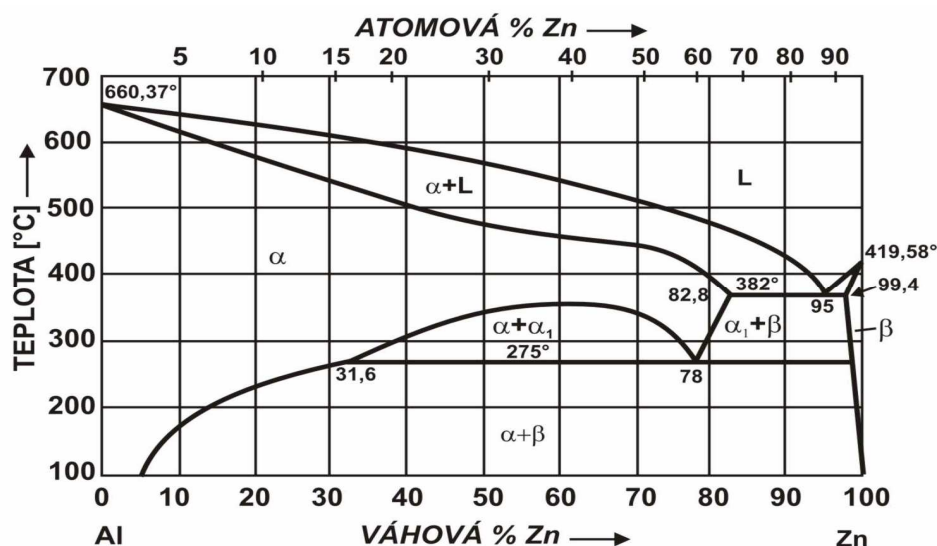


Obr. 2-3 Ukázka některých odlitků ze slitin zinku

Základní fyzikální vlastnosti zinku

- a) hustota 7130 [kg/m³]
- b) teplota tavení 419 °C
- c) teplota varu 906 °C
- d) molární hmotnost 65,37
- e) tepelná vodivost 113 [W/mK]
- f) měrné teplo 0,39 [kJ/kgK]
- g) latentní teplo tání 100 [kJ/kg]

Slévárenské slitiny zinku - jako hlavní přísadový prvek se používá hliník. Rovnovážný diagram systému Zn-Al, viz obr. 2-4, je typem diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika. Eutektikum je tvořeno fází Zn-ZnAl. Eutektická teplota systému Zn-Al je rovna 382°C při koncentraci 5,5% Al. Obsah hliníku v normalizovaných slitinách se pohybuje v rozmezí 4 až 27% Al.



Obr. 2 - 4 Rovnovážný binární diagram Al-Zn

Je zřejmé, slévárenské slitiny přibližně mají eutektické až nadeutektické složení a tuhnutí obvykle začíná vylučování primární fáze α -Al. Nejnižší tavící teplotu a nejužší interval tuhnutí mají přibližně eutektické slitiny s obsahem kolem 4 až 5% Al. Čím vyšší budeme mít obsah hliníku, tím vyšší je teplota likvidu a také je širší pásmo tuhnutí. Jako vedlejší přísadové prvky zde můžeme použít především měď a hořčík.

Měď - má především za úkol zjemnit zrno, zvýšit mechanické vlastnosti slitiny, zvláště pevnost, tažnost a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu nad 0,7% Cu se zlepšuje odolnost vůči korozi. Ve slitinách se obvykle vyskytuje obsah mědi v rozmezí 0,5 až 3%.

Hořčík - ve velmi malém množství nám zvyšuje pevnost a kompenzuje škodlivý vliv cínu, olova a kadmia. Obsah hořčíku bývá 0,01 až 0,03% Mg. Podle základních prvků se často tyto slitiny označují zkratkou ZAMAK. (Zinek, Magnezium, Měď).

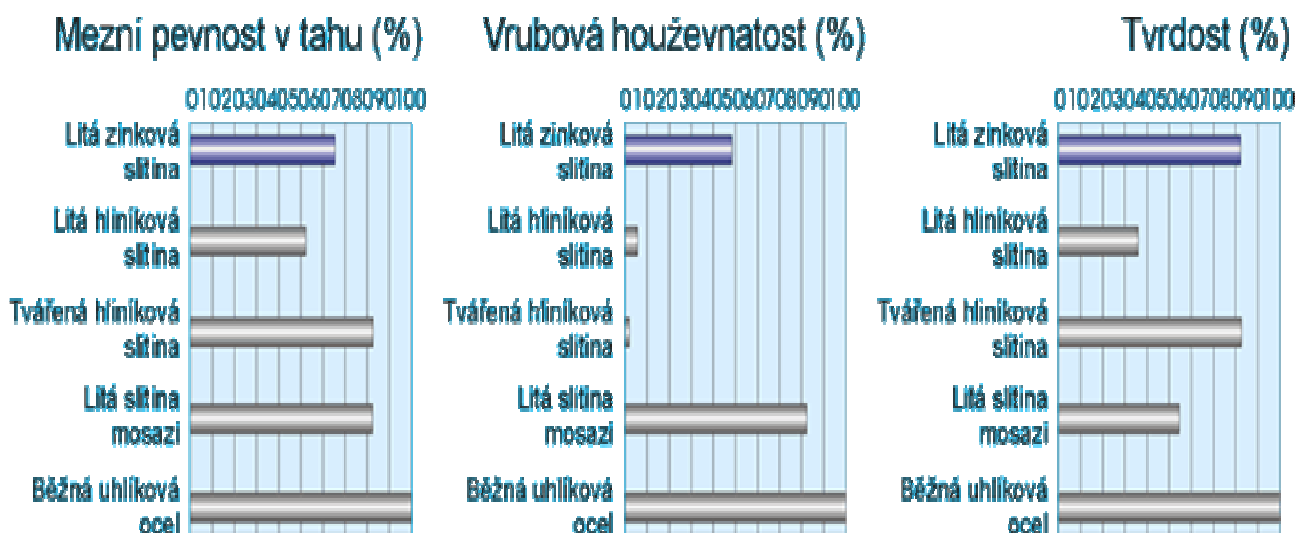
Nečistotami jsou zvláště železo, olovo, kadmium a cín. Tyto nečistoty především podporují vznik interkrystalické koroze a jejich obsah nesmí překročit řádově tisícinu procenta. Z tohoto důvodu se při výrobě slitin musí vycházet z velmi čistého základního kovu s obsahem 99,995% Zn. Pro výrobu odlitků se používají zejména slitiny s obsahem 8, 12 a 27% Al. Chemické složení je uvedeno v tabulce. V dnešní době se pro tlakové lití používá skupina slitin s obsahem kolem 4% Al, označována dle obsahu Al, Cu a Mg jako Z400, Z410 a Z430. Tyto slitiny mají nižší mechanické vlastnosti a rychlejší pokles pevnosti za zvýšených teplot.

Základní vlastnosti zinkové slitiny ZAMAK

- a) hustota je cca 7000 [kg.m⁻³]
- b) teplota tání - cca 380 °C
- c) pevnost v tahu - cca 350 MPa
- d) tažnost - cca 3 %
- e) tvrdost - cca 100 HB

Specifikace - těžký neželezný kov, korozivzdorný v prostředí slabě kyselém i zásaditém, snadno obrobitelný, lešitelný, charakterem podobný šedé litině. Typické chemické složení: 2 % Al, 2 % Cu, 0,04 % Mg, 0,07 % Fe, 0,004 % Pb+Sn+Cd, zbytek Zn.

Na obr. 2-5 je schéma vlastností slitin zinku s dalšími vybranými materiály.



Obr. 2 – 5 Srovnání vlastností lité zinkové slitiny s dalšími slévarenskými materiály

V tabulce 2.2 je uvedeno chemické složení slitiny Zn-Al (ZAMAK)

Tabulka 2.2 Chemické složení slitin Zn-Al

		Zn-Al 8	Zn-Al 12	Zn-Al 27
	Obsah prvků [%]			
Přísadové prvky	Al	8,0-8,8	11,0-11,5	25,0-28,0
	Cu	0,8-1,3	0,5-1,25	2,0-2,5
	Mg	0,015-0,03	0,015-0,03	0,01-0,02
Nečistoty	Fe	<0,10	<0,075	<0,10
	Pb	<0,004	<0,004	<0,004
	Cd	<0,003	<0,003	<0,003
	Sn	<0,002	<0,002	<0,002

V tabulce 2.3 jsou uvedeny fyzikální a mechanické vlastnosti slitin Zn-Al při gravitačním lití do pískových a do kovových forem a při tlakovém lití, vztaženo k teplotě 20 °C.

Tabulka 2.3 Přehled fyzikálních a mechanických vlastností Zn-Al

Vlastnost	Hodnoty vybraných vlastností odlitků ze slitin zinku odlévaných různými způsoby								
	Zn-Al 8	Zn-Al 8	Zn-Al 8	Zn-Al 12	Zn-Al 12	Zn-Al 12	Zn-Al 27	Zn-Al 27	Zn-Al 27
	Písek	Kokila	Tlak.lití*) tepl. kom.	Písek	Kokila	Tlak.lití**) stud. kom.	Písek	Kokila	Tlak.lití**) stud.kom.
R _m (MPa)	248-275	220-255	360-385	275-310	310-345	390-415	400-440	310-325	405-440
R _{p0,2} [MPa]	193-200	190-200	280-300	206-213	213-220	310-330	338-345	310-325	360-380
A ₅ (%)	1-2	1-2	5-10	1-3	2-5	4-7	3-6	8-11	1-2
HB	85-90	85-90	95-105	105-125	105-125	95-105	110-120	90-100	110-120
E(MPa)	85000			82500			75000		
Nárazová práce(Nm)	17-24			23-30			34-54	47-74	
Hustota(kg/m ³)	6,3			6,0			5,0		
Tavící teplota [°C]	375-404			375-432			375-487		

Poznámka: *) tlakové lití s teplou komorou, **) tlakové lití se studenou komorou
písek - tepelné zpracování pro snížení vnitřního pnutí odlitku
3 hodiny při 320°C pomalé ochlazování v peci

Z této tabulky nám vypývá, že slitiny zinku mají výborné mechanické vlastnosti za normálních teplot. Mají mnohem lepší vlastnosti než většina slitin hliníku, mědi a litiny s lupínkovým grafitem. Dynamické vlastnosti jsou také velmi dobré. Díky velmi značné tvrdosti jsou odlitky odolné vůči opotřebení. Značnou nevýhodou slitin zinku je především to, že je zde prudký pokles mechanických vlastností při vyšších teplotách. Maximální provozní teplota by neměla přesáhnout 120°C. Také při nízkých teplotách asi tak pod -20 °C dochází ke zhoršení mechanických vlastností především rázové houževnatosti.

Slévárenské vlastnosti - slitiny zinku se vyznačují velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi. Převážně slitiny - Zn-Al 8 a Zn-Al 11 mají úzké pásmo tuhnutí. Dobré je především to, že nedochází ke vzniku mikrostaženin a pórovitosti a proto mají odlitky z těchto slitin vynikající těsnost. (Slitina s 27% Al má velmi široké pásmo tuhnutí a proto větší sklon ke vzniku pórovitosti (mikroporosity)).

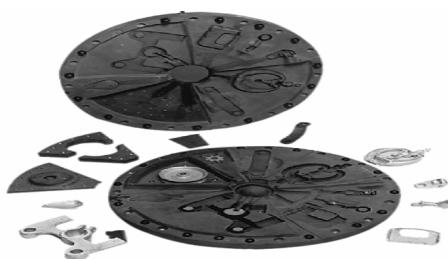
Licí teploty slitin - především dle typu slitiny a technologie odlévání 455 až 610 °C. Při těchto teplotách dochází pouze k malému namáhání forem. V pískových formách vzniká velmi málo plyných složek, proto neklademe ani velké nároky na žáruvzdornost ani prodyšnost. U kovových forem nám pak vzniká velká životnost. Slitiny zinku mají výbornou zabíhavost, díky této zabíhavosti můžeme odlévat tenkostěnné tvarově komplikované odlitky. Podle toho jakou chceme tloušťku stěny, to především závisí na velikosti odlitku a na technologii odlévání. Při tlakovém lití lze u malých odlitků dosáhnout tloušťek již od 0,3mm. Při gravitačním lití někde nad 1mm. Také zde je výborné především to, že slitina kopíruje tvar formy, odlitky tak dosahují ostrých hran. Pokud použijeme tlakové lití, tak se podaří předlít i otvory o průměru 1mm. Jelikož máme nízké teploty, tím dosáhneme vysoké přesnosti odlitků. Při tlakovém lití malých odlitků je reálná přesnost od $\pm 0,03\text{mm}$ (IT10) , u velkých odlitků s rozměry kolem 500mm přesnost $\pm 0,2\text{mm}$ (IT11) . Proto mnoho odlitků můžeme odlévat na hotovo, nebo navrhovat malé přídatky na obrábění. Odlitky mají kvalitní povrch s malou drsností.

Tavení - tavení probíhá buď v plynových nebo elektrických pecích. Tepelný obsah slitin zinku při licí teplotě je nízký je to způsobeno díky latentnímu a měrnému teplu. To znamená, že pro tavení dostačuje poměrně nízký instalovaný výkon pecí a náklady na tavení jsou taky velmi nízké. Při tavení musíme také zamezit možné kontaminaci škodlivými prvky. Doporučené tavení je v kelímcích z SiC (co se zásadně nedoporučuje tavit v kovových kelímcích) . Kelímek má být používán výhradně pro tavení slitin zinku. Hlavně nesmíme použít kelímky kde jsme v předchozí době tavily mosaz nebo slitiny mědi. To právě díky těm škodlivým prvkům. Zde nemusíme provádět rafinaci ani odplynění. Nepoužíváme žádné tavící přípravky. Pokud přehříváme nebo tavíme na běžné teploty, tak nám nevzniká kouř a ani žádné jiné výpary.

Technologie odlévání - tyto slitiny zinku můžeme odlévat všemi běžnými slévárenskými metodami, především však převažuje metoda tlakového lití. Pokud odléváme 8 až 12% Al je možno používat stroje s teplotou komorou tak i se studenou tlakovou komorou. Ošetřovací nástřik se neprovádí po každém cyklu, ale až po několika odlití. Nehrozí zde nalepování odlitku nebo reakce kovu s formou. Slitiny označené Zn-Al27 mají již poněkud vyšší lící teplotu, při které může docházet ke kontaminaci se železem z formy. Tudíž odléváme na strojích, které mají studenou komoru, kde máme teplotu formy nižší.

Tlakovým litím se převážně vyrábí drobné a středně velké odlitky do rozměrů 300 až 400mm s vysokou sériovostí. Nejvíce běžné odlitky jsou skříně, víka, rámy, tělesa tepelných výměníků.....atd.

Lití do pískových forem se používá hlavně pro kusovou výrobu. Převážně se jedná o větší odlitky. Také zde můžeme odlévat do sádrových forem. Velmi technicky zajímavá a progresivní metoda je lití do pryžových forem tzv. TEKCAST. Nevýhodou je především, že pryž nevydrží moc velkou teplotu a mohlo by dojít k degradaci. Formy se jednoduše vyrábí - lisováním speciální pryžové hmoty na připravené modely a následnou vulkanizací. Operace se provádí přímo ve slévárně. Do vulkanizované formy se ručně vyříznou vtoky, případně odvzdušňovací systém. Odlévá se odstředivým litím na zařízení se svislou osou rotace. Životnost pryžových forem pro slitiny zinku dosahuje několika set odlití. Metoda se hodí především pro výrobu drobnějších předmětů jako jsou například šperky, kování nábytkové, bižuterie, viz obr. 2 – 6. Další ukázky odlitků ze slitin zinku jsou na obr. 2 – 7.



Obr. 2 - 6 Ukázky odlitků ze slitin zinku odlévaných odstředivým litím do pryžové formy

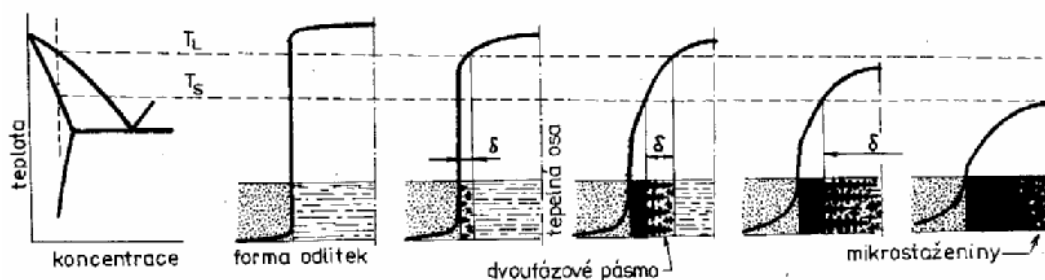


Obr. 2 – 7 Odlitky ze slitin zinku

2.2 Rozměrové změny při tuhnutí odlitku

Během tuhnutí a chladnutí odlitků probíhají fyzikální jevy, které ovlivňují konečný tvar i homogenitu odlitku. Je to především smršťování kovu při poklesu teploty, které jednak mění výsledné vnější rozměry odlitku, jednak vyvolává podmínky k vytváření vnitřních dutin. Zároveň s poklesem teploty se snižuje rozpustnost plynů v kovu a uvolňující se plyny mohou rovněž ovlivnit homogenitu odlitku.

Tuhnutím odlitků se rozumí vytváření souvislé vrstvy tuhé fáze na úkor fáze tekuté. Postup tuhnutí je určován teplotním polem v soustavě odlitek - forma, které závisí na charakteristikách odlitku a fyzikálně-tepelných vlastnostech slitiny a formy. Tuhnutí odlitků probíhá v dvoufázovém pásmu, tj. oblastí mezi izolikvidou a izosolidou (izotermami spojujícími místa, s teplotou likvidy, resp. solidu). Takovéto tuhnutí je označováno jako tuhnutí neprogresivní (dvoufázové), viz. obr. 2-8.



Obr.2-8 Postup tuhnutí odlitku

U čistých kovů a eutektických slitin probíhá tuhnutí při určité teplotě ve velmi úzkém pásmu. Toto tuhnutí se označuje jako progresivní (vrstevnaté). široké dvoufázové pásmo je nepříznivé pro jakost odlitků. Mezi rostoucími krystaly tu zůstávají uzavřeny ostrůvky taveniny, po jejichž ztuhnutí zbudou mikrostaženiny. Jejich výskyt je nejvyšší v okolí tepelné osy odlitku, tj. v místech, které tuhnou naposledy.

Šířka dvoufázového pásma ∂ je závislá především na:

- rozdílu mezi teplotou likvidy a solidu slitiny,
- teplotní vodivosti slitiny,
- rychlosti přestupu tepla z odlitku do formy,
- tvaru a tloušťce stěny odlitku,
- licí teplotě.

Široké dvoufázové pásmo mají především tlustostěnné odlitky ze slitin se širokým intervalem tuhnutí lité do pískových forem.

2. 2. 1 Objemové změny [1]

Podstatou smršťování jsou objemové změny tekuté a tuhé fáze kovu s poklesem teploty a objemové změny při fázových přeměnách. Projevují se charakteristickými změnami v odlitku, při nichž se jeho celkové rozměry zmenšují, popř. se v něm vytvářejí staženiny a dochází k vnitřnímu pnutí. Posuzujeme-li konečný rozměr odlitku z hlediska komplexních vlivů, musíme k základním vlivům počítat nejen dilatace vázané na druh použité slitiny, ale i dilatace formy, do níž se odlévá, a vliv tvaru odlitku.

Objem kovu je při dané teplotě a tlaku konstantní. Při normálním tlaku je objem funkcí teploty. Měřidlem přírůstku objemu na stupeň zvýšení teploty je koeficient objemové roztažnosti:

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (2.1)$$

kde je: γ ...součinitel objemové roztažnosti (smrštění) $[K^{-1}]$,

V_0 ... počáteční objem $[m^3]$,

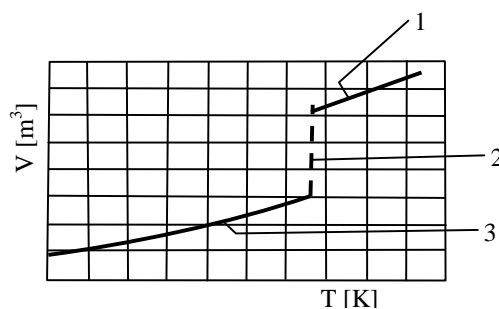
ΔV ...změna objemu $[m^3]$,

ΔT ...změna teploty $[K]$.

S rostoucí teplotou se plynule mění objem kovu a zároveň dochází k poklesu jeho hustoty. Je to dáno tím, že se zvětšuje parametr krystalové mřížky, tím klesá její hustota a přestože je krystalická stavba kovu v podstatě stejná, mění se meziatomové vzdálenosti. Určité teplotě tedy odpovídá určitá meziatomová vzdálenost. Při zahřívání se zvětšuje, při ochlazení naopak zmenšuje. Pokud se tyto vzdálenosti nemohou v důsledku nějakého vnějšího zásahu měnit, vznikají v mřížce pnutí. Při změně skupenství se pak mění objem skokem s dalším plynulým přírůstkem v tekutém stavu (viz obr 2-9). Fyzikální proces změny objemu při změně teploty je vratný, tudíž objem zvětšující se při ohřevu se při ochlazení vrací do původní velikosti. Úbytek objemu při snížení teploty se nazývá smrštění. Křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě je zobrazena na obr. 2-9.

Obr.2-9 Křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě

- 1 - smrštění v tekutém stavu ,
- 2 - smrštění při změně skupenství,
- 3 - smrštění v tuhém stavu.



U slitin tuhoucích při konstantní teplotě je průběh závislosti změny objemu na teplotě stejný, jako u čistých kovů. U slitin tuhoucích v teplotním intervalu nastává velká změna mezi T_L a T_S .

Smrštění odlitku vyrobeného z určité slitiny není stejné jako smrštění této slitiny. Smrštění slitiny je fyzikální vlastnost, kterou určuje fyzikální úbytek objemu při snížení teploty. Smrštění odlitku závisí na smrštění slitiny a závisí technologických podmínkách výroby odlitku, jako jsou teplota a čas lití, intenzita odvodu tepla a konstrukce odlitku. Změny objemu odlitku charakterizuje technologický úbytek objemu. Objemové změny při tuhnutí a ochlazení odlitku se dělí dle teplotního intervalu na:

- a) objemové změny v tekutém stavu (interval teplot $T_{lití} - T_L$)
- b) objemové změny v intervalu tuhnutí ($T_L - T_S$)
- c) objemové (lineární) změny v tuhém stavu ($T_{zls} - T_{op}$, teplota začátku lineárního smrštění - teplota okolního prostředí).

Objemové změny v tekutém stavu - ihned po odlití taveniny do formy začíná odvod tepla z kovu, tavenina chladne a dochází ke smršťování v tekutém stavu, které probíhá od teploty lití T_{lit} až do teploty likvidu T_L . Objemové změny se v tomto teplotním intervalu se projevují poklesem hladiny taveniny vlivem gravitační síly. Tuto fázi smrštění v tekutém stavu charakterizuje úbytek objemu $\Delta V'_L$.

Hladina klesá do té doby, než se na stěnách odlitku vytvoří souvislá vrstva tuhého kovu až k povrchu hladiny. Od tohoto okamžiku začne klesající hladina zužovat svůj průměr a zvýší se rychlost jejího klesání. V tomto čase nastává úbytek objemu $\Delta V''_L$.

Hodnota celkové změny objemu odlitku v kapalném stavu bude:

$$\Delta V_L = \Delta V'_L + \Delta V''_L = \gamma_L \cdot (T_{lit} - T_L) \cdot V_0 \quad (2.2)$$

kde je:

V_0 ...počáteční objem taveniny;

γ_L ...průměrná hodnota součinitele objemového smrštění v teplotním

intervalu $T_{lit} - T_L$ [K^{-1}].

Z tohoto vztahu vyplývá, že hodnota ΔV_L je přímo úměrná teplotě přehřátí taveniny nad teplotou likvidu a tedy, že míru smrštění můžeme ovlivnit regulací teploty lití. Nejúčinnějším prostředkem proti smrštění je co nejnižší lití teplota. Tu lze nejnázše dosáhnout při lití pod tlakem.

Objemové změny v intervalu tuhnutí - v intervalu tuhnutí probíhá změna tekuté fáze ve fázi tuhhou. Podle teoretických úvah o vnitřní stavbě taveniny lze očekávat, že po ztuhnutí bude mít krystalická fáze při téže teplotě menší objem, neboť ubude volných prostor mezi krystalovými elementy, které jsou pro roztavený kov charakteristické. Takto se smrštění

v intervalu tuhnutí projevuje u čistých kovů. U komplexních slévárenských slitin může být průběh smršťování ovlivněn vylučováním několika tuhých fází.

Objemové změny mezi teplotami likvidu a solidu ΔV_{L-S} , se projevují vznikem soustředné staženiny, vnitrodendritické a mezidendritické pórovitosti. Rozdělení objemových změn mezi uvedené dutiny závisí na morfologii tuhnutí slitiny a na intenzitě chladnutí odlitku.

Smršťování odlitku při tuhnutí začíná vznikem prvních tuhých částic z taveniny na stěně formy a končí ztuhnutím poslední části taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí se vyskytují všechny druhy objemových změn současně.

Při tuhnutí čistých kovů a slitin, s nulovým rozsahem teplot tuhnutí, tedy při tuhnutí s plynulým postupem souvislé krystalické fronty, vzniká soustředná staženina o objemu V_{st} . Staženina se začíná vytvářet, když na celé ploše líce formy ztuhne souvislá vrstva kovu, uzavírající uvnitř taveninu. Od tohoto okamžiku plynule probíhá:

- a) zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu $\Delta V''_{L_s}$, což se projeví snížením její hladiny ve formě.
- b) zvětšení objemu tuhé fáze tzv. narůstáním a její postup k tepelné ose odlitku, přičemž se zároveň zmenšuje objem o hodnotu ΔV_{L-S} , protože dochází k fázové přeměně.

$$\Delta V_{L-S} = \gamma_s \cdot (T_L - T_s) \cdot V_0 \quad (2.3)$$

kde je:

V_0 ...počáteční objem [m^3],

γ_s ...průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v teplotním intervalu

$T_L - T_s$ [K^l].

- c) zmenšení plochy klesající hladiny v důsledku postupu tuhé fáze k tepelné ose odlitku.
- d) smrštění ztuhlých částí při jejich ochlazování o hodnotu ΔV_s , které se projeví změnou lineárních rozměrů. Zmenšení lineárních rozměrů ztuhlých částí ovlivňuje rozměry

tvořících se dutin tím, že smršťující se vrstva se vmáčkne do taveniny a tím vyzvedne její hladinu.

Výsledkem uvedených pochodů je soustředná staženina, jejíž výsledný celkový objem pak je:

$$V_{st} = \Delta V_L'' + \Delta V_{L-S} - \Delta V_S \quad (2.4)$$

Při tuhnutí odlitku ze slitiny s intervalem tuhnutí jsou probíhající změny v podstatě stejné, ale úbytek objemu ΔV_L se rozdělí mezi soustřednou staženinu V_{st} , mezidendritickou pórovitost V_{md} a vnitrodendritickou pórovitost V_{vd}

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_{vd} + V_{md} \quad (2.5)$$

Mezidendritické póry se vytváří při tuhnutí taveniny uzavřené mezi dendrity. Vnitrodendritické póry vznikají při tuhnutí taveniny uzavřené mezi větvemi dendritu. Z tohoto můžeme vztah (2.5) zjednodušit na:

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_d \quad (2.6)$$

Rozsah dendritické pórovitosti V_d je přímo úměrný šířce intervalu tuhnutí slitiny. Čím širší je tento interval, tím větší je rozsah dendritické pórovitosti. Tato skutečnost souvisí se schopností slitiny nahradit úbytek vlastního objemu při tuhnutí, tedy přefiltrovat se přes svoje dvojfázové pásmo, protože pokud se mají kompenzovat ztráty objemu při tuhnutí, musí se tavenina profiltrovat do nejhlubší části dvojfázového pásma, a to vždy k souvislému povrchu tuhé fáze. Zvýšením intenzity ochlazování je možné na počátku tuhnutí výrazně zmenšit dvojfázové pásmo a tím i rozsah dendritické pórovitosti.

Vnitřní zdravost odlitku se hodnotí poměrem $\frac{V_{st}}{\Delta V_{L-S}}$. Čím více se tento poměr blíží

k 1, tím je větší zdravost odlitku. Tento způsob hodnocení je důležitý, protože odstranění

dendritické pórovitosti z odlitku, neboli kompenzace objemu V_d je složitější, než kompenzace objemových ztrát staženiny V_{st} .

Odlitky ze slitin s úzkým intervalem tuhnutí se složením blízkým eutektickému (hliníkové bronzy, mosazi, siluminy) vytvářejí při tuhnutí soustředěné staženiny velkých rozměrů. U těchto slitin se vytváří pouze úzké dvoufázové pásmo, při kterém téměř nevzniká dendritická pórovitost. Dvoufázové pásmo nabývá na významu při tuhnutí odlitků ze slitin s širokým intervalem tuhnutí (cínové bronzy, slitiny Al – Mg, Al – Cu, Mg – Al). U těchto slitin jsou dány objemové změny staženinou malých rozměrů a poměrně rozsáhlou dendritickou pórovitostí.

Výskyt mikrostaženin nezávisí pouze na intervalu tuhnutí dané slitiny, ale také na dalších činitelích, jakými jsou tepelná vodivost, měrná hmotnost slitiny v tuhém i tekutém stavu, rychlost ochlazování odlitku, teplota lití a velikost doplňovacího tlaku.

Objemové (lineární) změny v tuhém stavu - smrštění odlitku v tuhém stavu se projevuje především změnou rozměrů, a proto se označuje jako lineární smrštění nebo také jako tepelná dilatace. Pojem tepelná dilatace znamená souhrnnou změnu objemu (rozměrů) tuhé fáze v závislosti na teplotě a to při jejím chladnutí i ohřevu. Praktický význam lineárního smrštění je, že určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a výrazně ovlivňuje velikost napjetí v odlitku.

Změna rozměrů při ochlazování začíná v okamžiku vytvořením kostry s určitou pevností navzájem zaklíněných dendritů. Teplota, při které se vytvoří tato kostra, se nachází v teplotním intervalu tuhnutí slitiny a je teplotou začátku lineárního smrštění $T_{z.l.s.}$. Po úplném ztuhnutí odlitku se plynule zmenšují rozměry až do vychladnutí na teplotu okolního prostředí T_{op} . Dilatace odlitku bez působení odporů je volnou tepelnou dilatací. Volná objemová tepelná dilatace ΔV_s^V je dána vztahem:

$$\Delta V_s^V = \gamma_s (T_{z.l.s.} - T_{op}) \cdot V_0 \quad (2.7)$$

kde je:

V_0 ...počáteční objem odlitku [m^3],

γ_s ...průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v intervalu

teplot $T_L - T_S$ [K^{-1}].

Volná objemová dilatace je spojena se změnou lineárních rozměrů přibližně vztahem:

$$\Delta V_s^V \cong 3\Delta l_V \quad (2.8)$$

kde je:

Δl_V ...hodnota úbytku rozměru odlitku.

Rozměr odlitku l_V po jeho volném smrštění je dán vztahem:

$$l_V = l_Z - \Delta l_V = l_Z - l_Z \cdot (T_{z.l.s} - T_{op}) \quad (2.9)$$

Hodnota relativní (poměrné) volné dilatace ε_V je:

$$\varepsilon_V = \frac{l_Z - l_V}{l_Z} \cdot 100 = \alpha \cdot (T_{z.l.s} - T_{op}) \cdot 100 \quad (2.10)$$

kde je:

l_Z ...počáteční rozměr odlitku při teplotě $T_{z.l.s}$, který se rovná rozměru formy $[m]$,

l_V ...rozměr odlitku po volné dilataci, tj. při teplotě okolního prostředí $T_{op} [m]$,

α ...průměrná hodnota součinitele volného délkového smrštění v intervalu teplot

$(T_{z.l.s} - T_{op}) [K^{-1}]$.

Skutečný rozměr odlitku, tj. rozměr naměřený na odlitku po jeho uvolnění z formy, se liší od hodnoty l_V podle vztahu (2.9) a zpravidla je větší. Vysvětluje se to tím, že po vytvoření kostry dendritů určujících geometrický tvar odlitku změna rozměrů odlitku probíhá při překonávání odporů působících proti smrštění. Smrštění odlitku při působení odporů je skutečné smrštění a označuje se jako bržděné smrštění nebo jako bržděná tepelná dilatace ε_B , přičemž hodnota ε_B není rovna hodnotě volné dilatace ε_V . Brždění dilatace je příčinou vzniku napětí v odlitku. Podle charakteru odporů působících proti volné dilataci rozlišujeme smršťovací, tepelné a transformační napětí.

Smršťovací napětí je výsledkem odporu formy a jádra proti volné dilataci odlitku. Toto napětí je vždy tahové a dočasné. Působí pouze po dobu, kdy přetrvává mechanický odpor formy. Smršťovací napětí je příčinou vzniku trhlin.

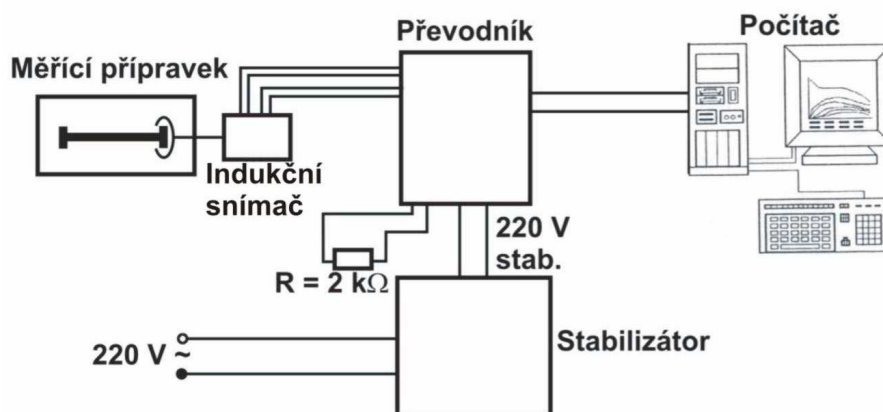
Tepelné napětí je vyvolané rozdílnou rychlostí chladnutí nebo ohřevu jednotlivých objemů odlitku. Tenké části se ochlazují rychleji než tlustší a to je příčinou neizotermického ochlazování odlitku jako celku. Části odlitku s různou teplotou mají i rozdílné rozměry, a proto si navzájem překáží při smrštění, což může zapříčinit vznik prasklin. Tepelné napětí může být dočasné nebo zbytkové.

Transformační (fázové) napětí vzniká v chladnoucím odlitku při fázové přeměně spojené se změnou specifického objemu a při neizotermickém chladnutí, tj. tehdy když fázová přeměna neprobíhá současně v jednotlivých objemech odlitku. Může být dočasné nebo zbytkové.

Uvedené rozdělení umožňuje klasifikaci příčin vyvolávajících napětí v odlitku, i když prvotní příčinou všech napětí je vždy nerovnoměrná změna rozměrů odlitku při jeho ochlazování. Každé napětí v odlitku se může projevit deformací nebo porušením celistvosti. Deformace mohou být pružné (dočasné) nebo plastické (trvalé).

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část této práce byla zaměřena na sledování průběhu volného smrštění při odlévání vybraných slitin hliníku a zinku. K tomuto účelu bylo využito zkušební zařízení pro zkoušku dle Bočvara a Sviderského a bylo upraveno pro snímání dilatačních změn během tuhnutí a chladnutí odlitků specifického tvaru „piškotu“. Pro snímání byl použit indukční snímač, dilatometr polské výroby a PC, skupinové schéma je na Obr. 3-1.



Obr. 3-1 Skupinové schéma zařízení pro měření volného smršťování odlitku

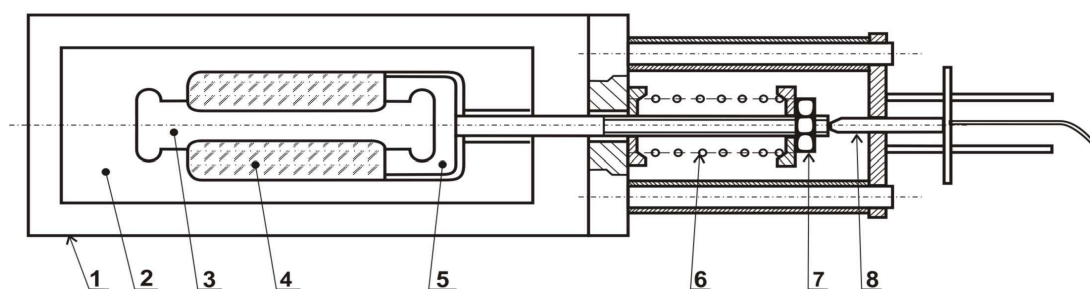
3.1 Charakteristika měřicího zařízení

Měřicí zařízení je tvořeno zařízením dle Bočvara a Sviderského. Dilatometr je určen pro měření dilatačních změn. Je zde závislost teploty na čase a také dilatace na čase. Připravíme si termočlánky, které uchytíme na stojan dále připojíme na kabel kde máme příslušné kabely označeny červeně (+) a modře (-). Kabel pomocí koncovky s kolíky připojíme do měřicího přístroje. Také připojíme dilatometr. Každá zásuvka v daném přístroji je pojmenována abychom věděli co kam patří. Tento přístroj Bočvara a Sviderského je spojen s Pc - technikou kde máme příslušný software, který komunikuje s měřicím přístrojem. V tomto softwaru si předem nastavíme hodnoty po spuštění programu už stačí jen odlévat. Odléval jsem čistý hliník (Al) kde předehřev v elektrické peci byl nastaven na 720 °C a z této teploty jsme odlévali i slitinu hliníku (AlSi7). Dále jsme čistý zinek předehřívali na teplotu 720 °C opět v elektrické peci a následně odlévali. Z této teploty jsme také odlévali i slitinu zinku (ZnAl4Cu3 (430)). Vždy jsme čekali až teplota klesne na 50 °C kde tento parametr jsme

navolili v daném softwaru. Všechny odlitky byly zhotoveny ve formičce, která nám připomíná podobu piškotu. Viz následující obrázky.



Obr 3-2 Ukázka části měřicího zařízení



1 - rám; 2 - kovová deska; 3 - dutina pro odlitek; 4 - část dutiny s pískovou směsí; 5 - pohyblivá kovová tvarová deska; 6 - tlačná pružina; 7 - matice; 8 - měřicí čidlo dilatace
Schéma měřicího zařízení podle Bočvara a Sviderského.

Obr 3-3 Schéma části měřicího zařízení



Obr 3-4 Pohled na část měřicího zařízení s pružinou pro volné (bržděné) smršťování

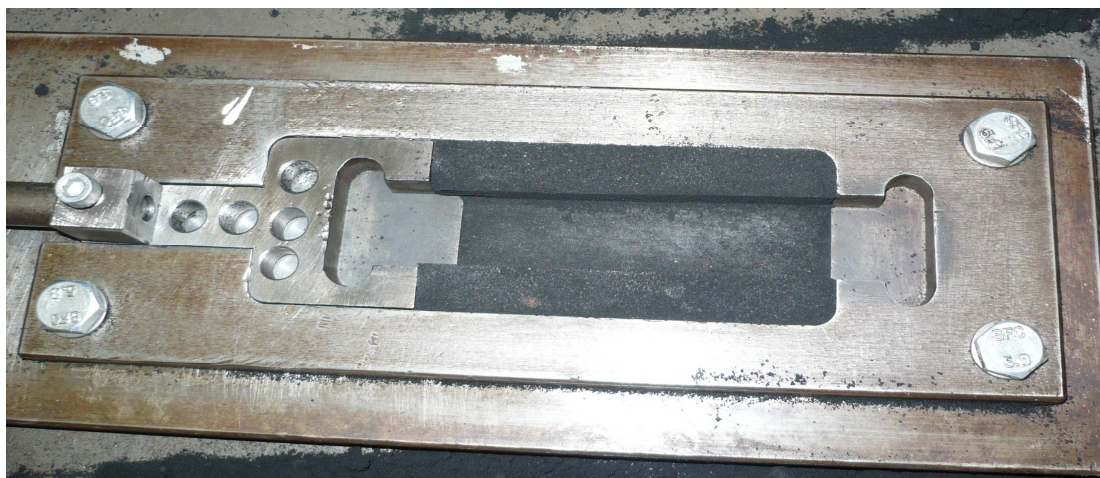
3.2 Příprava taveniny a zkušebního zařízení pro odlévání

Příprava taveniny byla spolu s experimenty prováděna v dílnách Katedry strojírenské technologie, Technické university v Liberci. Za dohledu slévačského mistra pana Drahoslava Vinše. Na obr. 3-5 je uvedena tavící pec s grafitovými kelímkami a zinkovými slitinami, které byly použity při experimentech.



Obr 3-5 Pec ve které bylo provedeno tavení slitin zinku

V další fázi je ukázána příprava formičky, která má tvar „piškotu“. Dutina formy je vymezena na okraji ocelovými tvarovými profily a střední partie je z formovací bentonitové směsi, viz obr. 3 – 6. Formovací bentonitová směs byla připravena v kolovém mísiči, dle obr. 3 – 7.



Obr 3-6 Kombinovaná dutiny formy pro odlitek tvaru „piškotu“



Obr 3-7 Kolový mísič s bentonitovou směsí

3.3 Postup prováděných experimentů

Postup prováděných experimentů byl následující. Do připravené dutiny formy byl zabudován termočlánek Ni-CrNi s korundovou dvoukapilárou $\varnothing 4 \times 150$ mm, průměry vodičů 0,2 mm. Termočlánek byl ustaven do tepelné osy odlitku. Pak bylo připraveno měřicí zařízení. Byla zkontrolována jeho funkčnost. Pak následovalo odlití. Před odlitím byla z taveniny slitiny zinku stažena struska a dále změřena teplota.

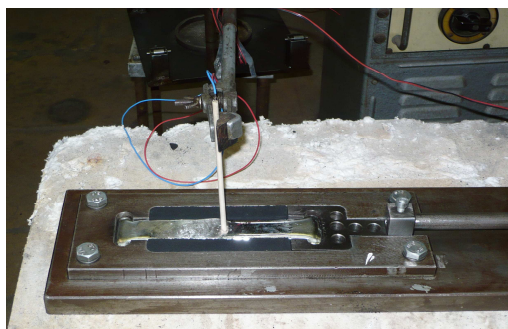
Odlévání použitých slitin zinku probíhalo z teploty 550 °C. Při použití slitin hliníku byla tavenina před odléváním ošetřena rafinační a modifikační solí T3 (2 g na 1 kg taveniny) a současně byla stažena struska. Teplota lití slitin hliníku probíhala při teplotě 720 °C.

V tabulce 3.4 je uveden přehled prováděných experimentů.

Tabulka 3.4 Přehled prováděných experimentů – sledování volného smršťování odlitků

Číslo měření	Typ odlévaného materiálu			
	Čistý hliník	Čistý zinek	AlSi7	ZnAl4Cu2
1.	X			
2.	X			
3.	X			
4.	X			
5.	X			
6.		X		
7.		X		
8.		X		
9.		X		
10.		X		
11.			X	
12.			X	
13.			X	
14.			X	
15.			X	
16.				X
17.				X
18.				X
19.				X
20.				X

Na obr. 3-8 je uveden okamžik odlití a na obr. 3 -9 pohled na měřicí zařízení.

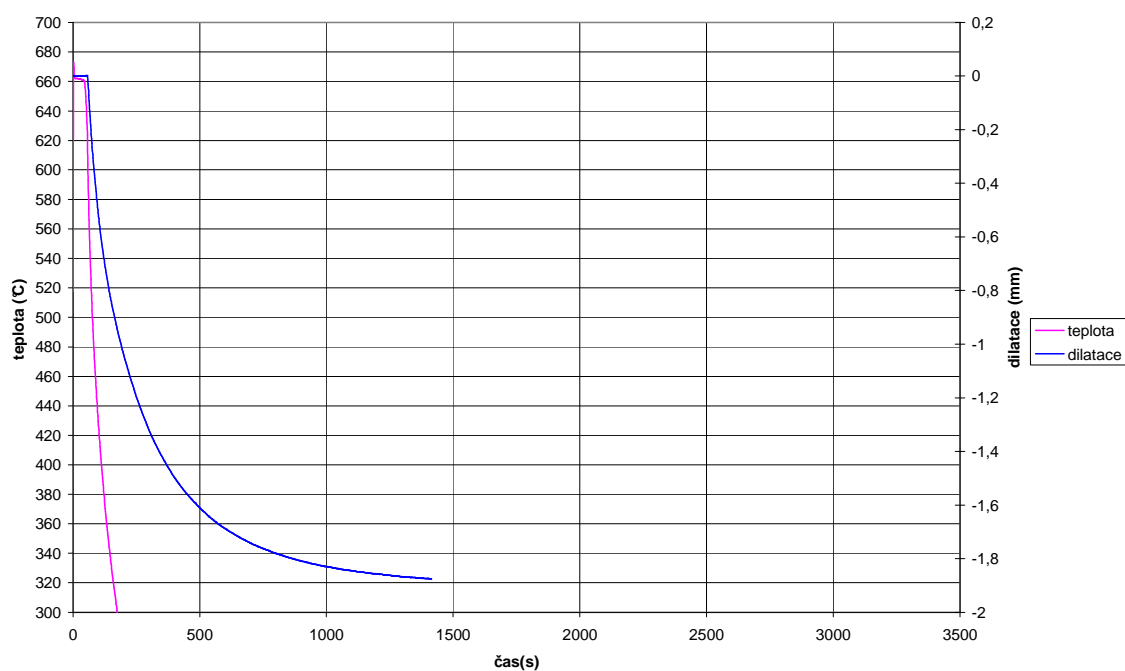


Obr. 3 – 8 Ukázka odlitku tvaru „piškoty“ s termočlánkem těsně po odlití.

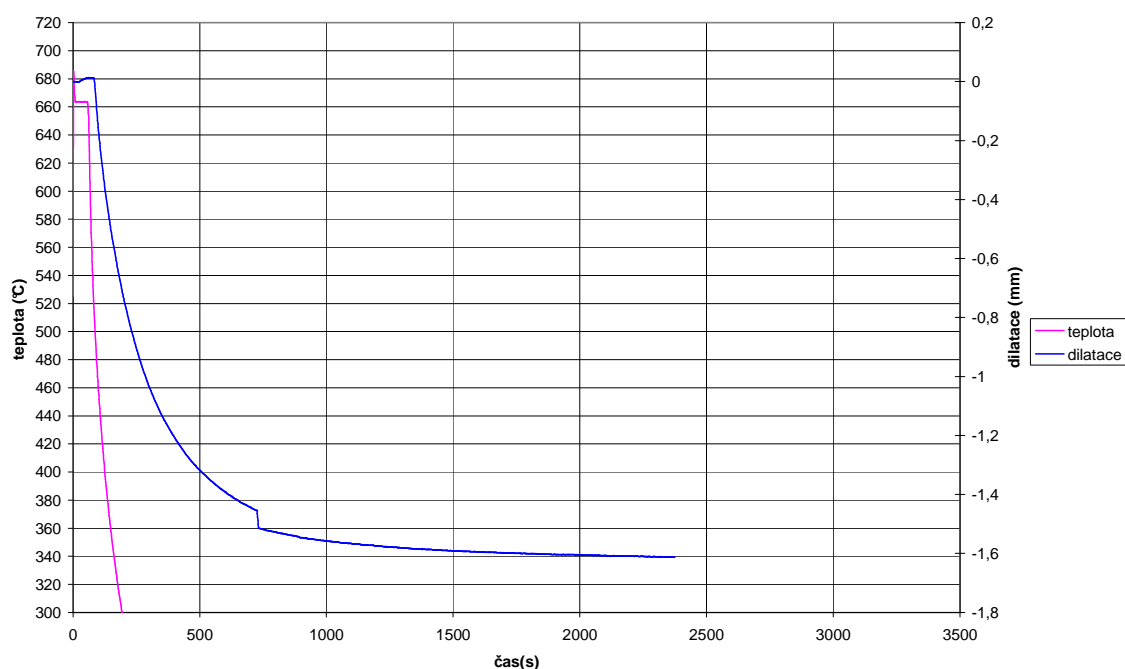


Obr 3-9 Pohled na celkové měřicí zařízení

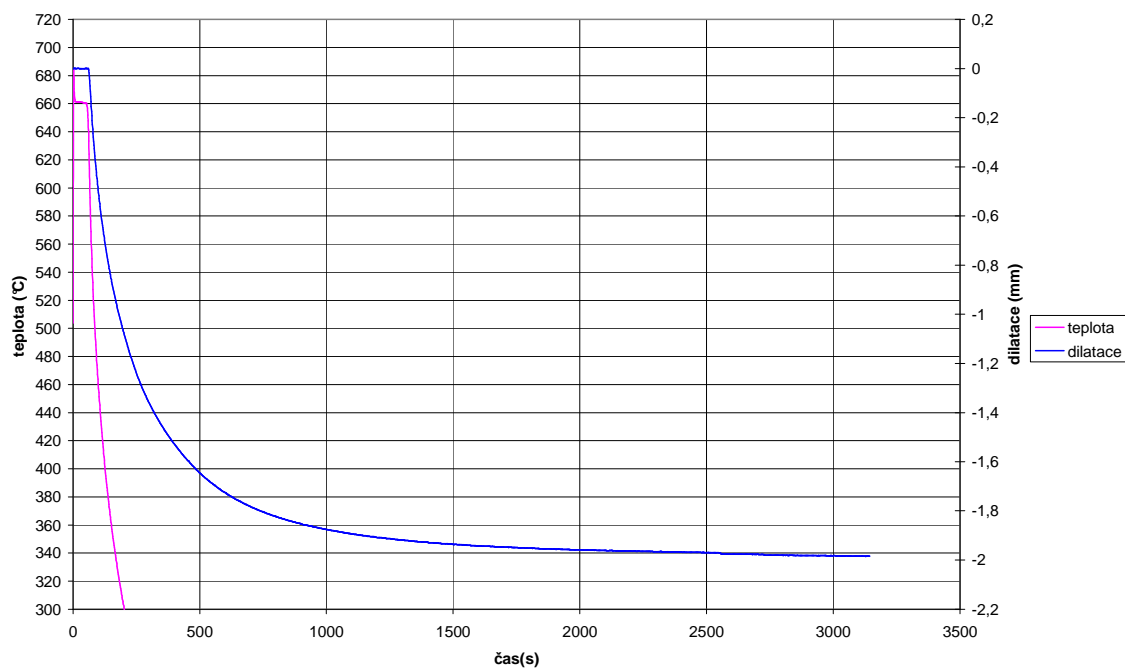
Současně v okamžiku odlití bylo spuštěno měřicí zařízení a byla sledována a registrována převodníkem a PC časová závislost teploty a průběhu změny délky tuhnoucího odlitku tvaru „piškoty“. Jak uvádí tabulka 3.4, celkem bylo provedeno 20 experimentů při kterých byly získány sledované závislosti, které jsou uvedeny na obr. 3 – 10 až 3 - 28. Na obr. 3-29 až 3 - 33 jsou uvedeny výsledné závislosti, které byly získány na základě průměrných hodnot z příslušných pěti grafických závislostí příslušných experimentů.



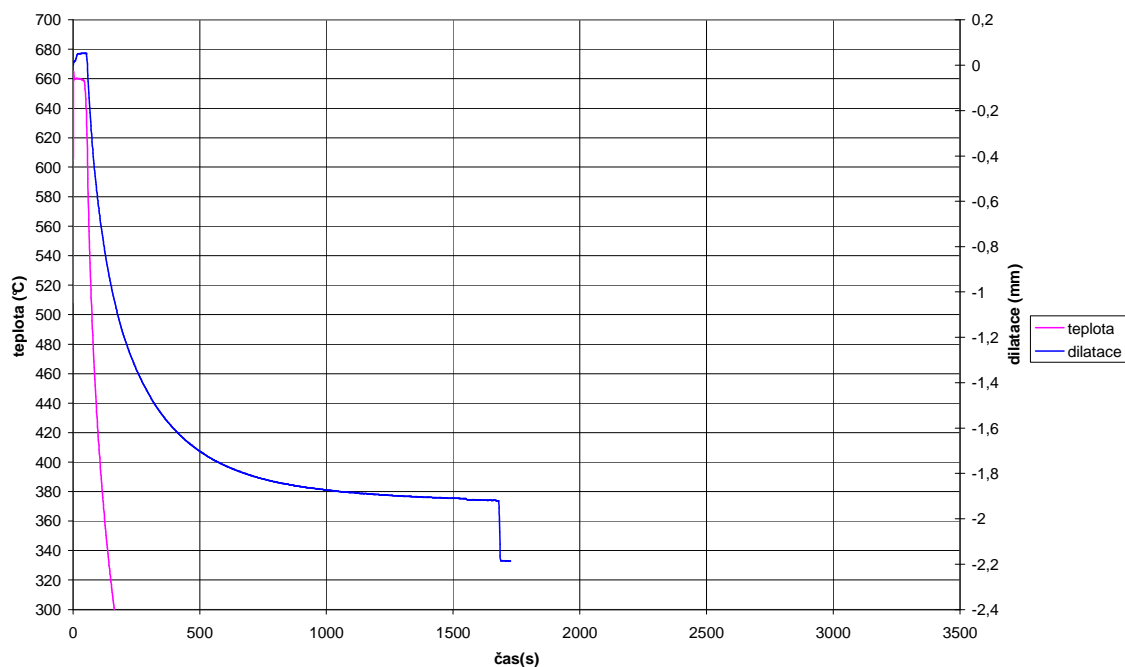
Obr. 3 – 10 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C



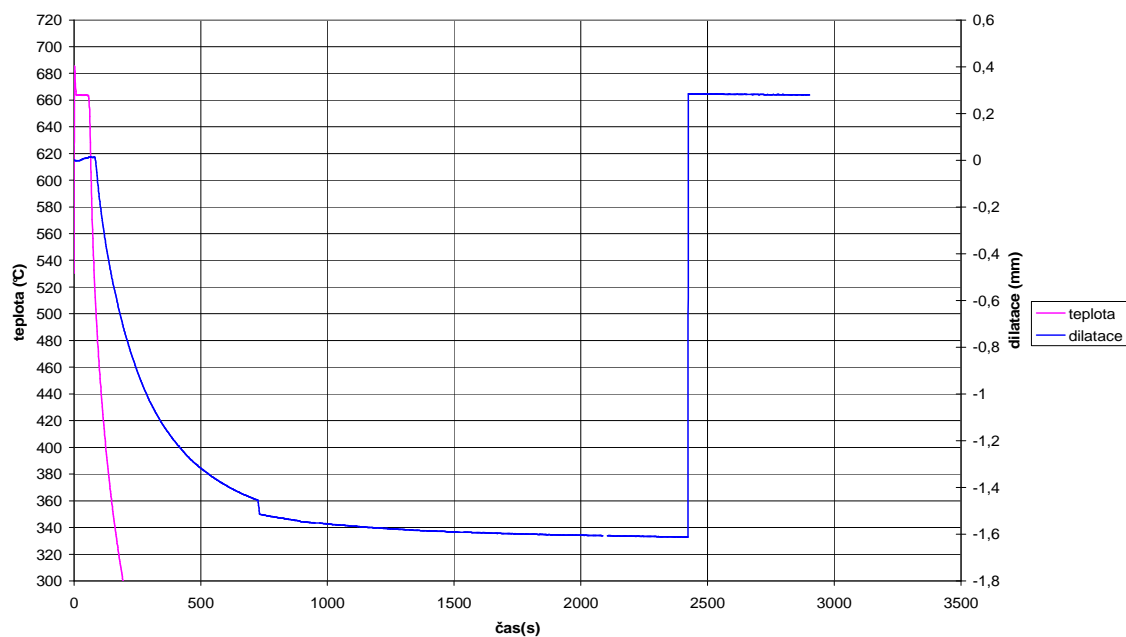
Obr. 3 – 11 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C



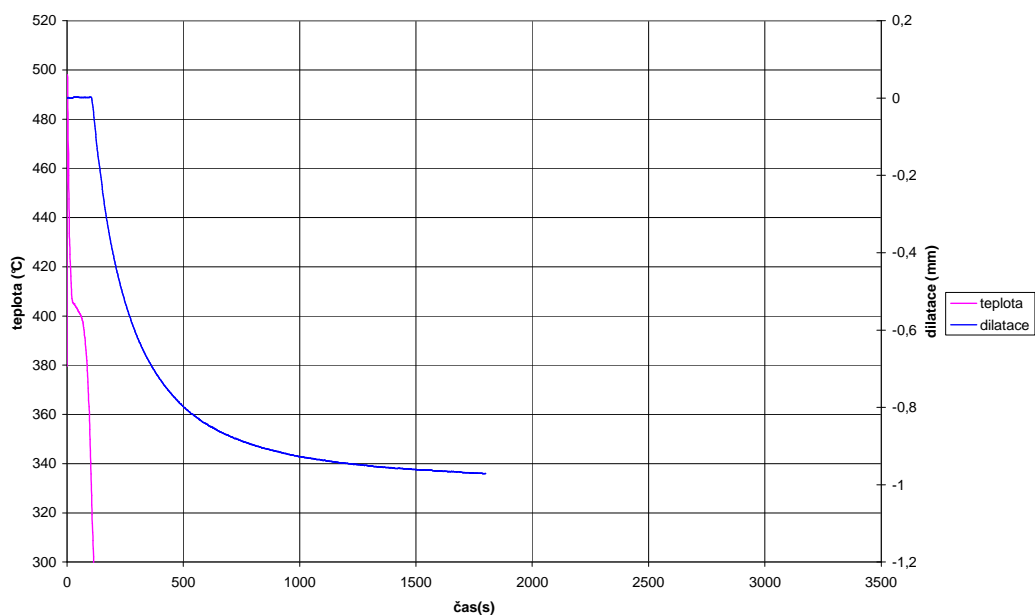
Obr. 3 – 12 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C



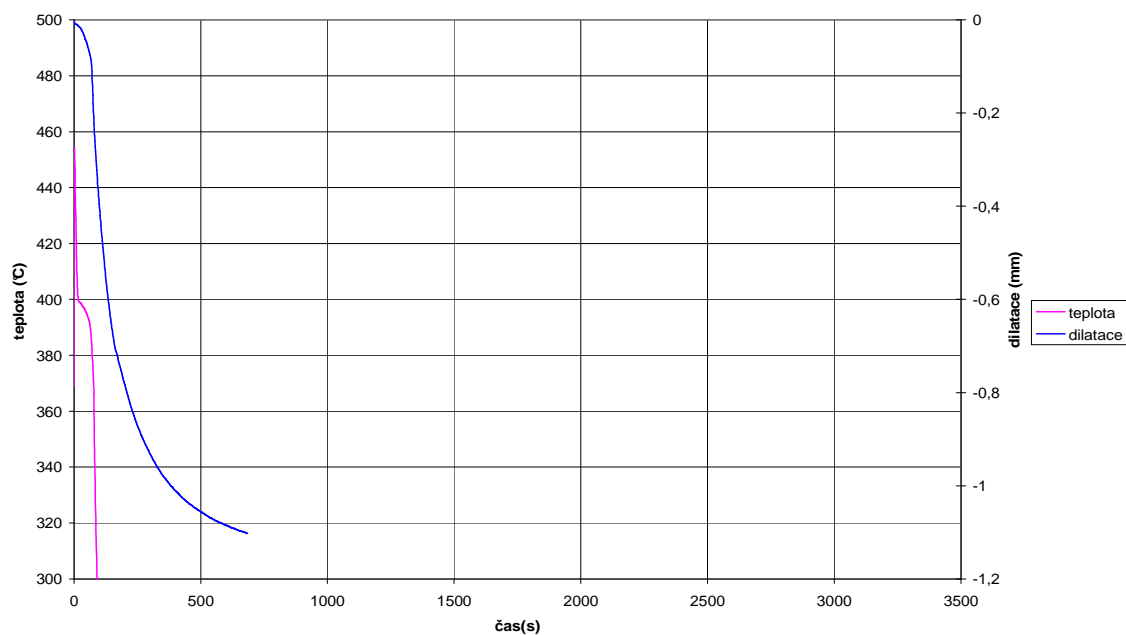
Obr. 3 – 13 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C



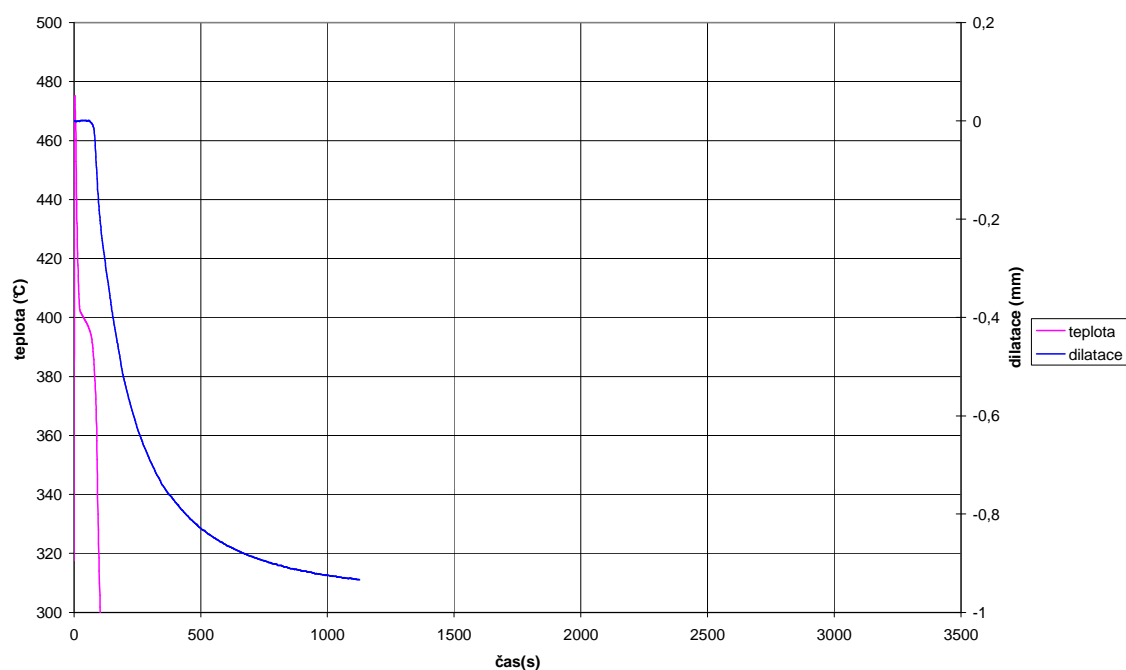
Obr. 3 – 14 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C



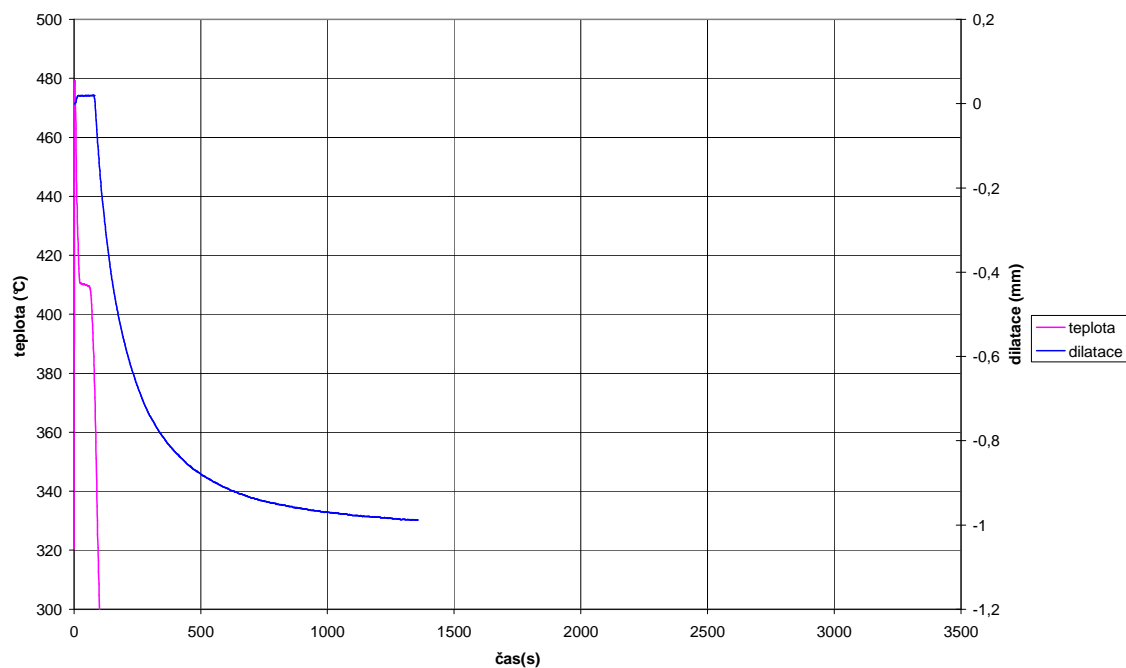
Obr. 3 – 15 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C



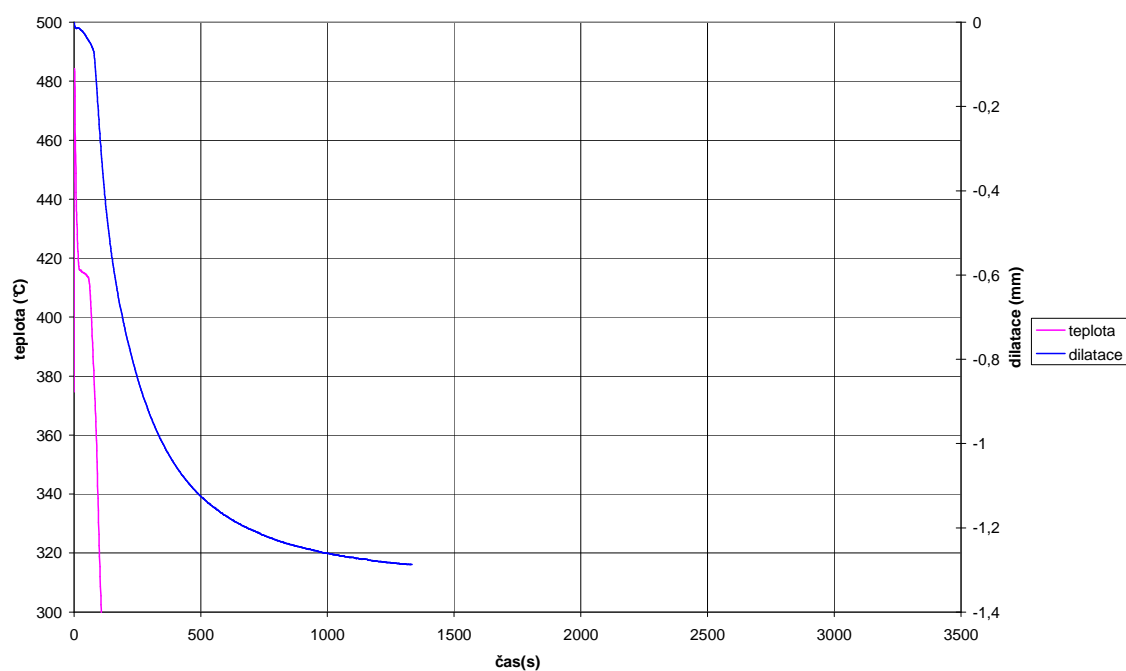
Obr. 3 – 16 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškovy“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C



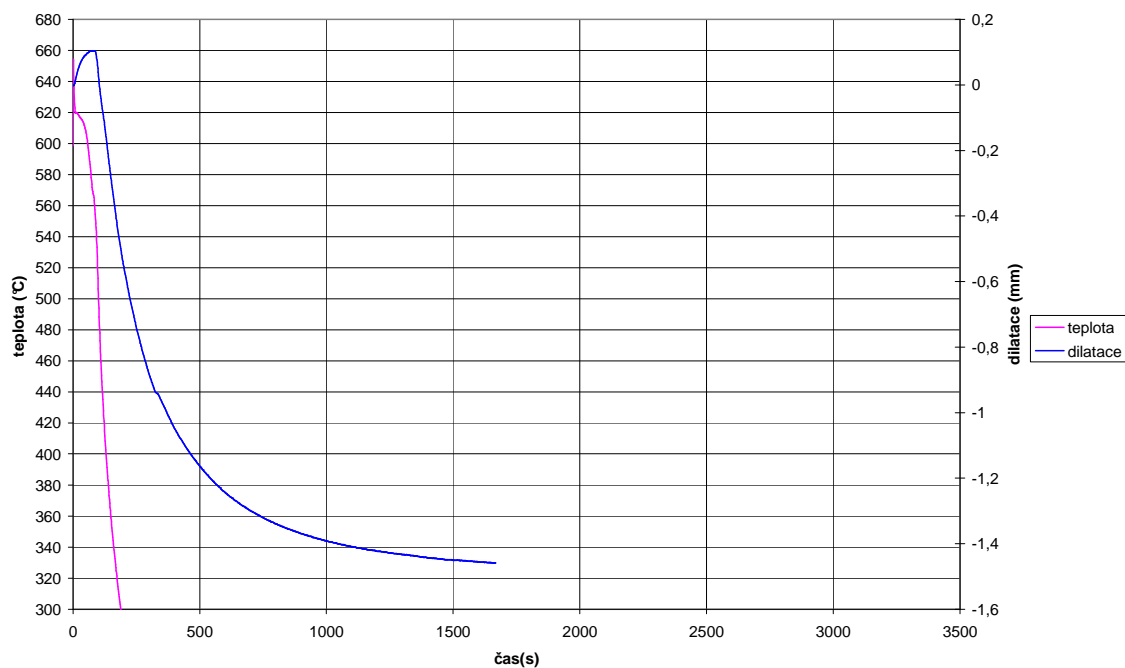
Obr. 3 – 17 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškovy“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C



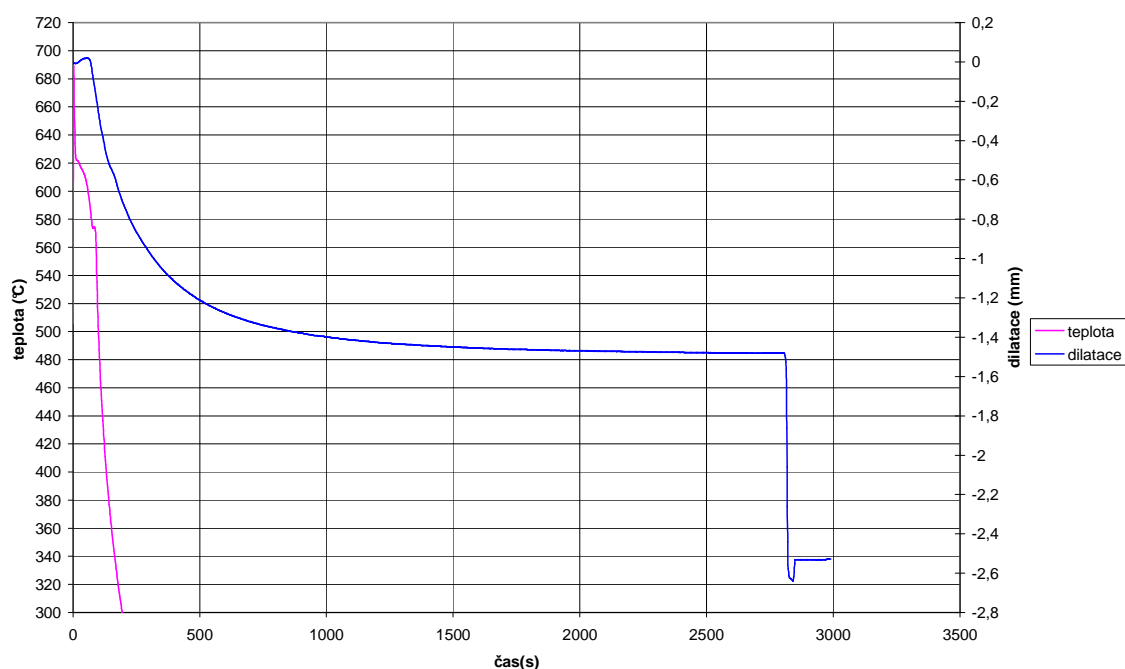
Obr. 3 – 18 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C



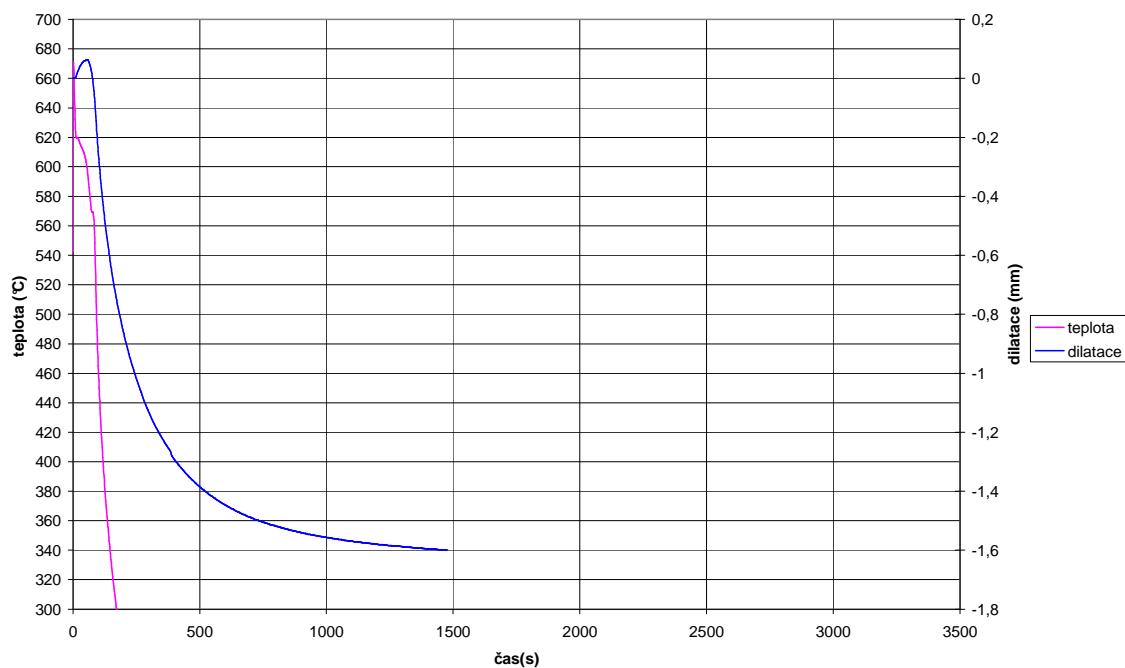
Obr. 3 – 19 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C



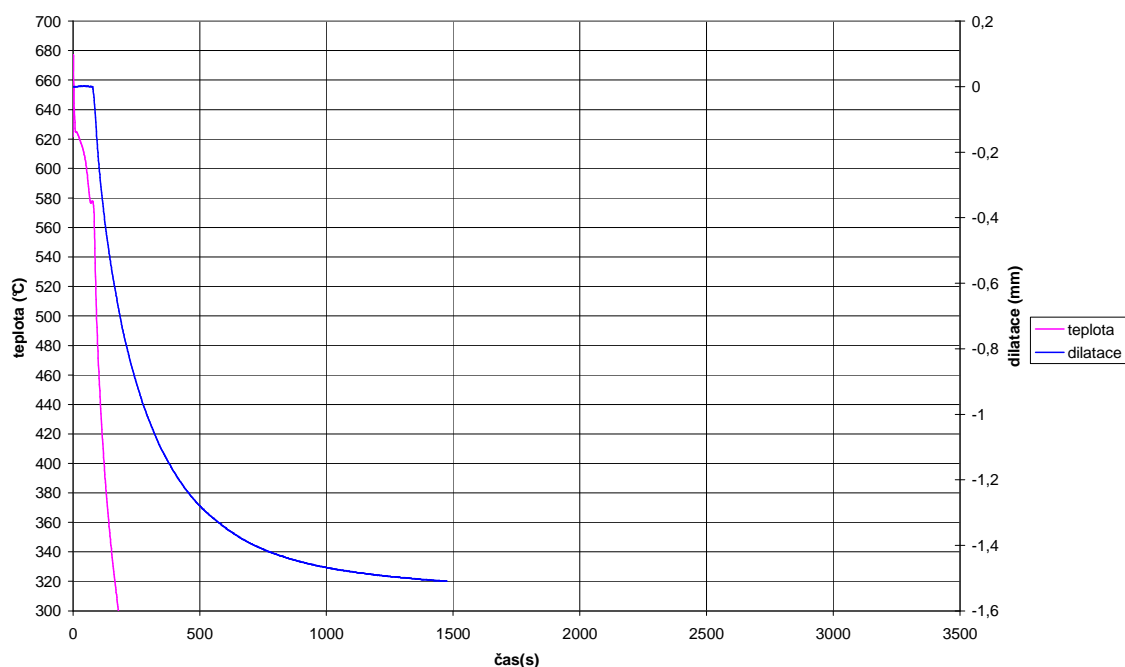
Obr. 3 – 20 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku AlSi7, odlévaného z teploty 720 °C



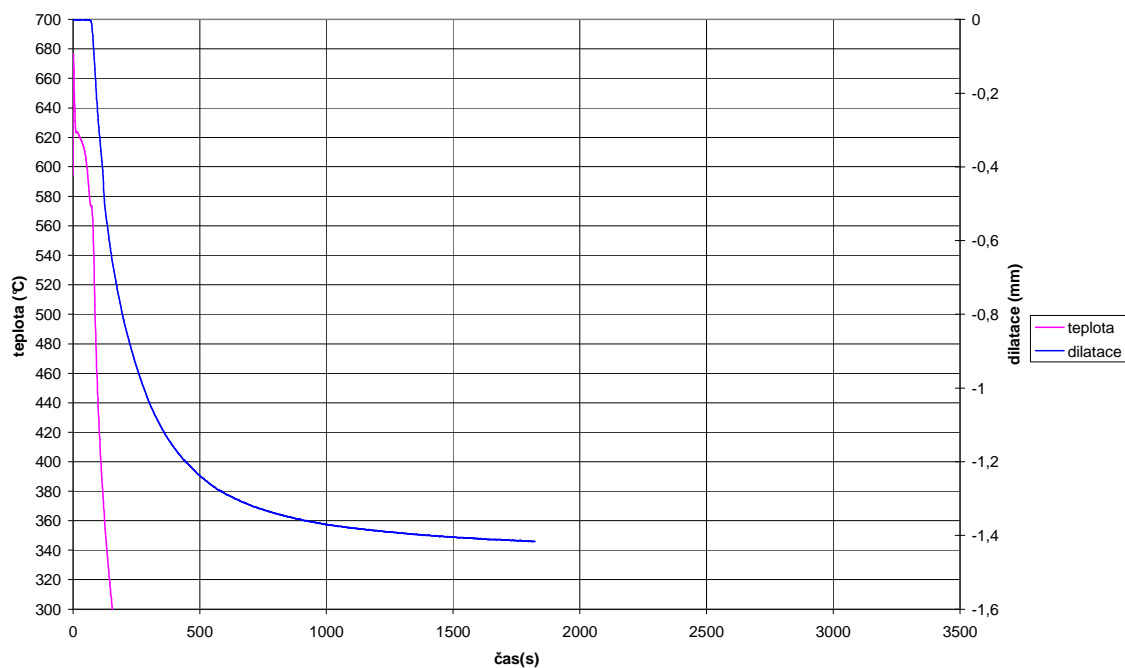
Obr. 3 – 21 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku AlSi7, odlévaného z teploty 720 °C



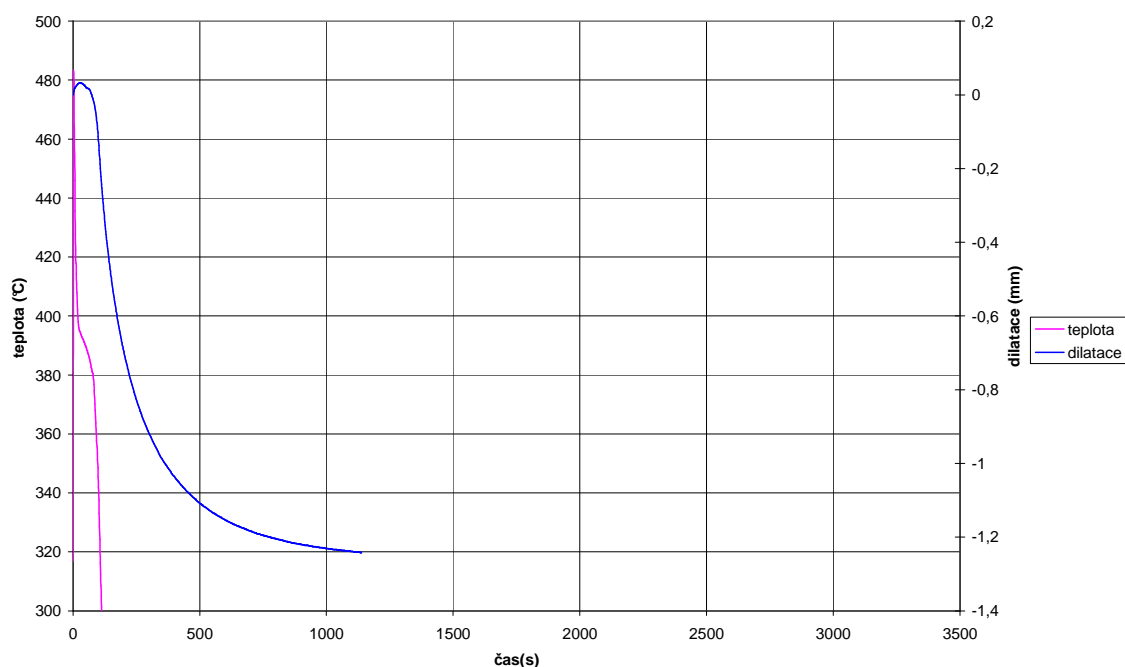
Obr. 3 – 22 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku AlSi7, odlévaného z teploty 720 °C



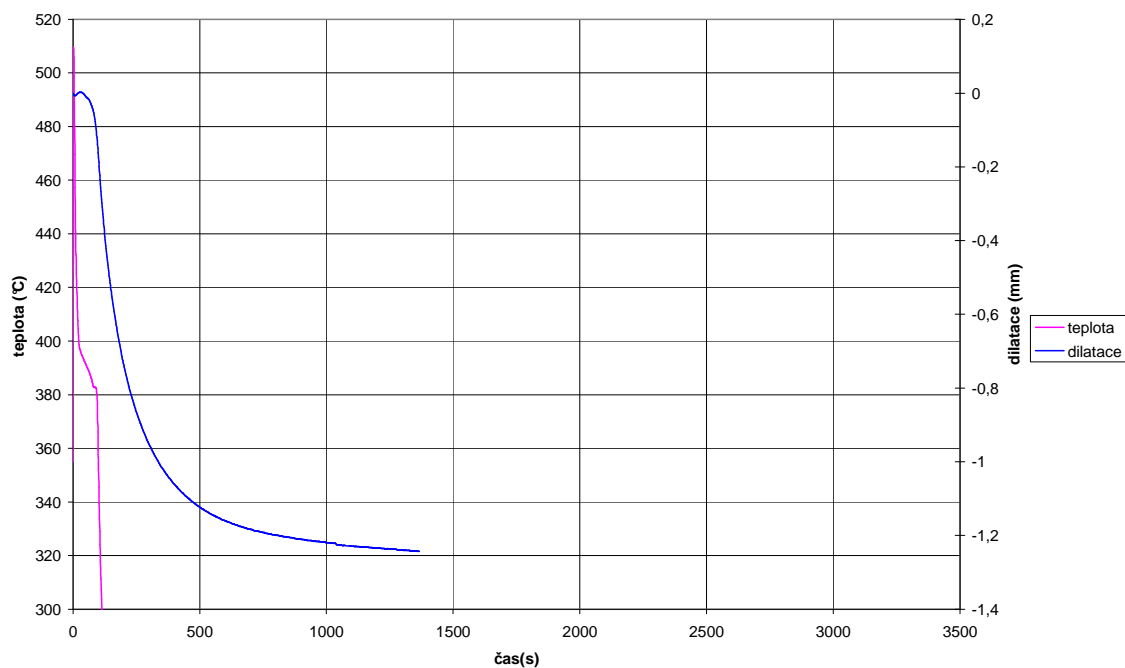
Obr. 3 – 23 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku AlSi7, odlévaného z teploty 720 °C



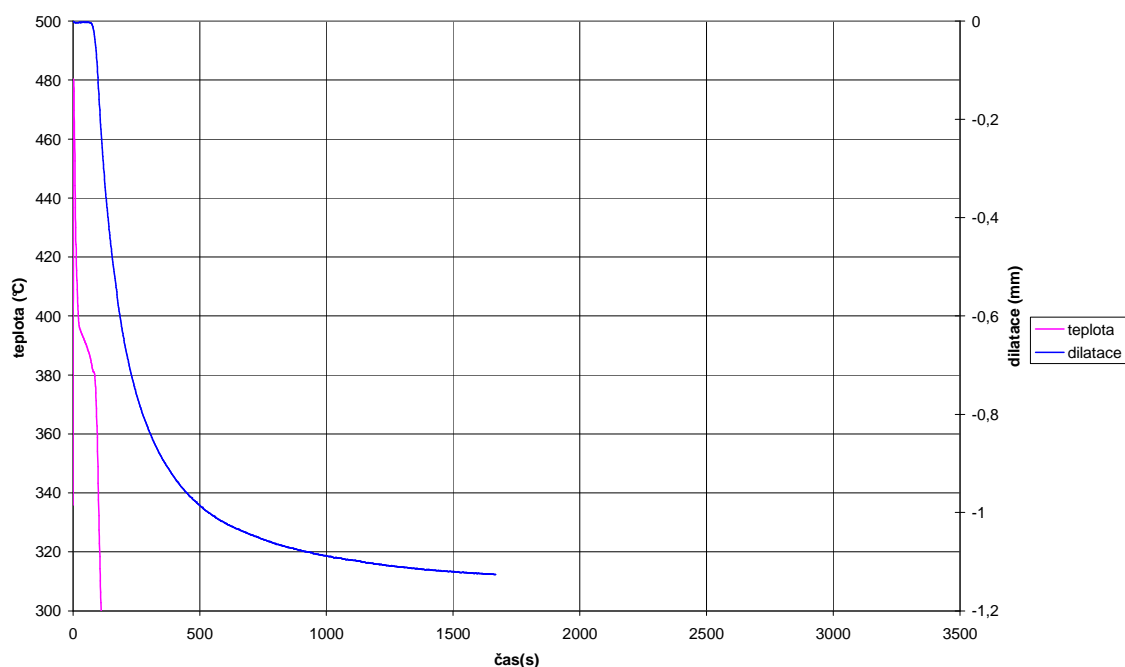
Obr. 3 – 24 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku AlSi7 , odlévaného z teploty 720 °C



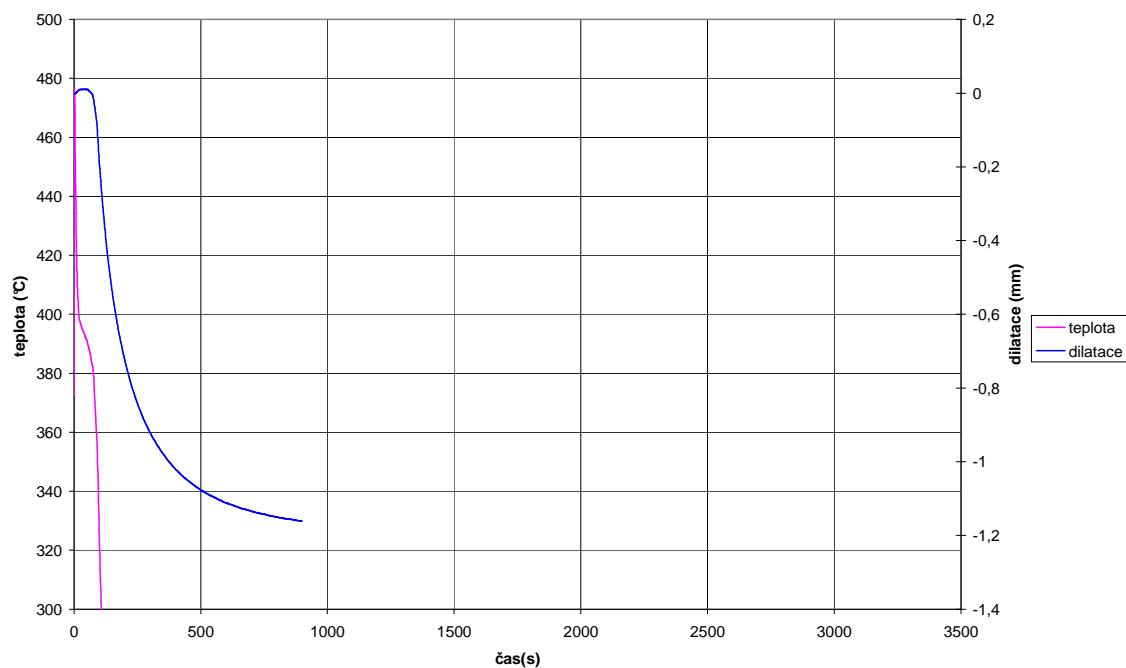
Obr. 3 – 25 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, odlévaného z teploty 550 °C



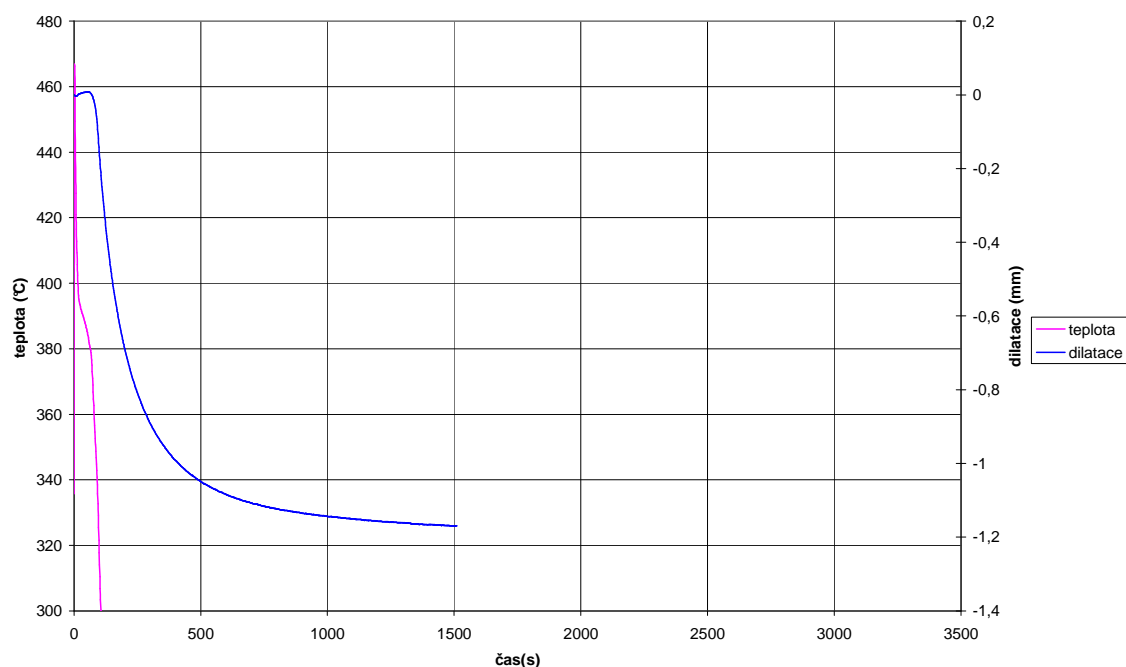
Obr. 3 – 26 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, odlévaného z teploty 550 °C



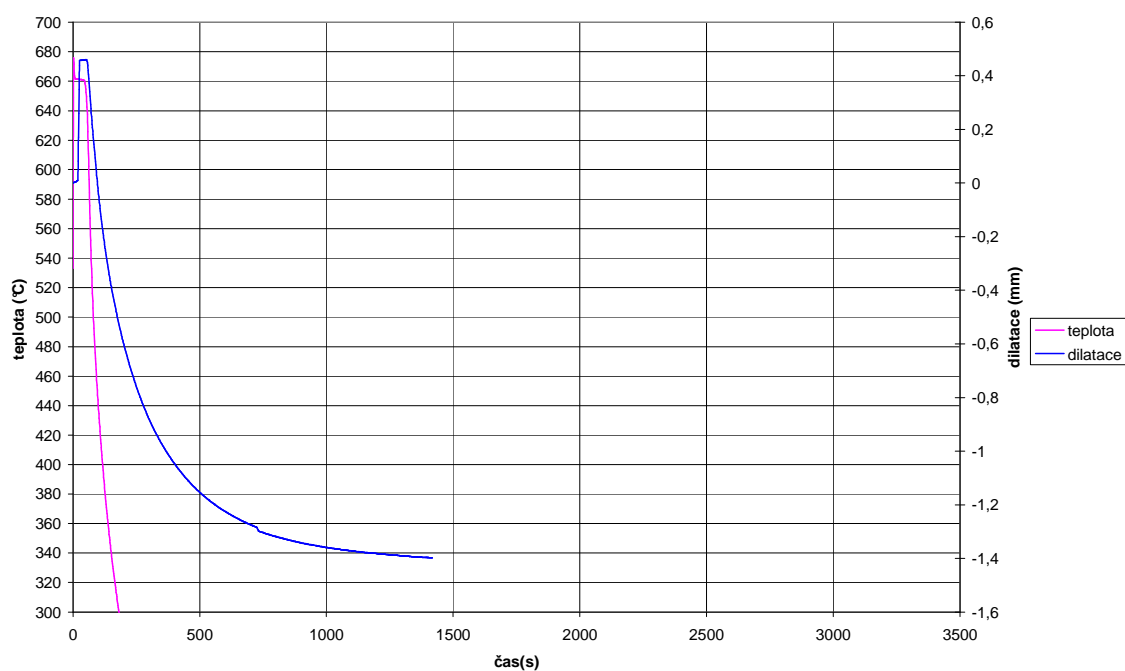
Obr. 3 – 27 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, odlévaného z teploty 550 °C



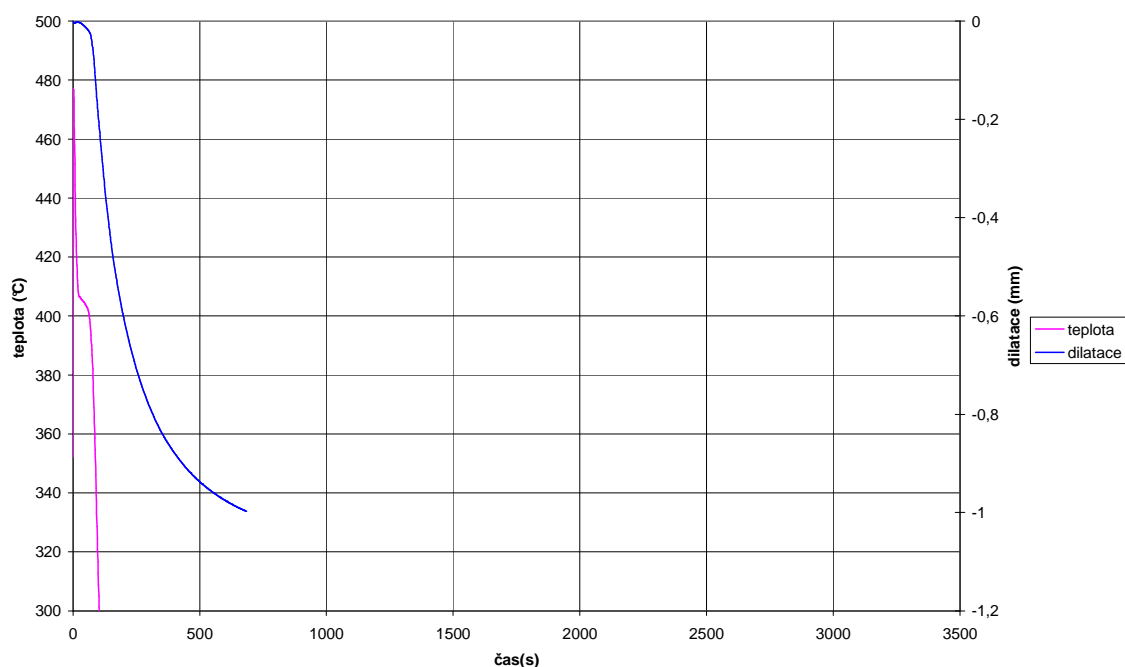
Obr. 3 – 28 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, odlévaného z teploty 550 °C



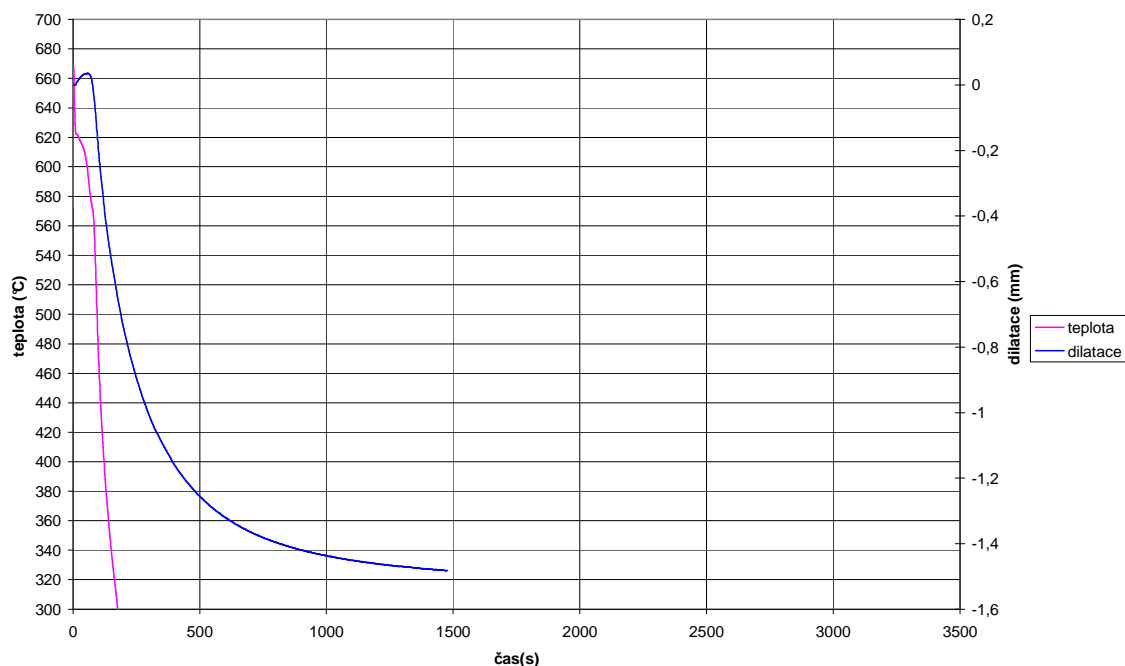
Obr. 3 – 29 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, odlévaného z teploty 550 °C



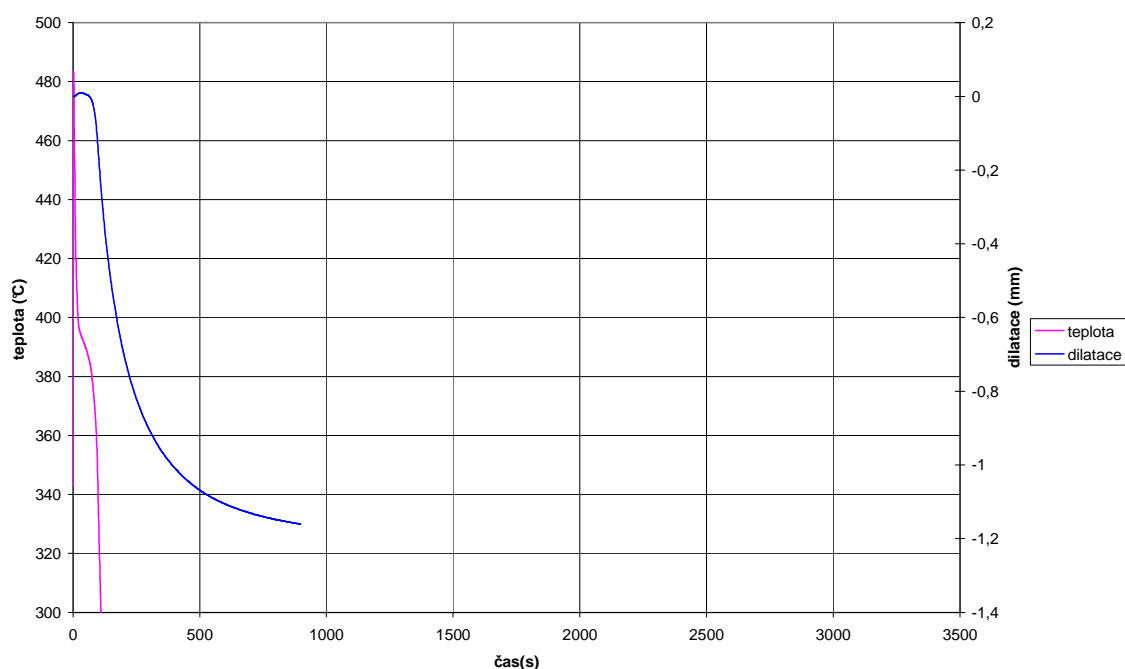
Obr. 3 – 30 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého hliníku, odlévaného z teploty 720 °C (*výsledná závislost*)



Obr. 3 – 31 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm z čistého zinku, odlévaného z teploty 550 °C (*výsledná závislost*)



Obr. 3 – 32 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny hliníku (AlSi7) odlévaného z teploty 720 °C (*výsledná závislost*)



Obr. 3 – 33 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „piškoty“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu3), odlévaného z teploty 550 °C (*výsledná závislost*)

3.4 Vyhodnocení naměřených závislostí

Grafické závislosti odlévání čistého hliníku, viz obr. 3 – 10 až 3 – 14.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 10, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C. V časovém okamžiku 60 s byla stanovena dilatace 0,03 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,55 mm, která odpovídal časovému okamžiku 104 s po odlití. V časovém okamžiku 1414 s dilatace činila 1,88 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz. obr. 3 – 11, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C. V časovém okamžiku 94 s byla zjištěna dilatace 0,09 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,17 mm, která odpovídal časovému okamžiku 101 s po odlití. V časovém okamžiku 2375 s dilatace činila 1,6 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz. obr. 3 – 12, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C. V časovém okamžiku 72 s byla zjištěna dilatace 0,15 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,53 mm, která odpovídal časovému okamžiku 103 s po odlití. V časovém okamžiku 3143 s dilatace činila 1,9 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz. obr. 3 – 13, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C. V časovém okamžiku 60 s byla zjištěna dilatace 0,07 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,42 mm, která odpovídal časovému okamžiku 82 s po odlití. V časovém okamžiku 3200 dilatace činila 2,2 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz. obr. 3 – 14, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C. V časovém okamžiku 61 s byla zjištěna dilatace 0,01 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,19 mm, která odpovídal časovému okamžiku 103 s po odlití. V časovém okamžiku 2425 s dilatace činila 1,6 mm po odlití.

Grafické závislosti odlévání čistého zinku, viz obr. 3 – 15 až 3 – 19.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 15, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 82 s byla stanovena dilatace 0,24 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,02 mm, která odpovídal časovému okamžiku 29 s po odlití. V časovému okamžiku 683 s dilatace činila 1,10 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 16, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 84 s byla stanovena dilatace 0,05 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,0007 mm, která odpovídal časovému okamžiku 34 s po odlití. V časovému okamžiku 1127 s dilatace činila 0,93 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 17, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 144 s byla stanovena dilatace 0,19 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,002 mm, která odpovídal časovému okamžiku 46 s po odlití. V časovému okamžiku 1799 s dilatace činila 0,97 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 18, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 104 s byla stanovena dilatace 0,29 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,02 mm, která odpovídal časovému okamžiku 35 s po odlití. V časovému okamžiku 1331 s dilatace činila 1,29 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 19, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 94 s byla stanovena dilatace 0,09 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 40 s po odlití. V časovému okamžiku 1355 s dilatace činila 0,99 mm po odlití.

Grafické závislosti odlévání slitiny hliníku AlSi7, viz obr. 3 – 20 až 3 – 24.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 20, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 a 560 °C. V časovém okamžiku 121 s byla zjištěna dilatace 0,10 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,10 mm, která odpovídal časovému okamžiku 84 s po odlití. V časovém okamžiku 1667 s dilatace činila 1,46 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 21, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 a 560 °C. V časovém okamžiku 152 s byla zjištěna dilatace 0,55 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,05 mm, která odpovídal časovému okamžiku 76 s po odlití. V časovém okamžiku 2844 s dilatace činila 2,61 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 22, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 a 560 °C. V časovém okamžiku 96 s byla zjištěna dilatace 0,20 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,04 mm, která odpovídal časovému okamžiku 67 s po odlití. V časovém okamžiku 1475 s dilatace činila 1,6 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 23, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 a 560 °C. V časovém okamžiku 96 s byla zjištěna dilatace 0,18 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,0004 mm, která odpovídal časovému okamžiku 73 s po odlití. V časovém okamžiku 1474 s dilatace činila 1,51 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz. obr. 3 – 24, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 a 560 °C. V časovém okamžiku 107 s byla zjištěna dilatace 0,33 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 72 s po odlití. V časovém okamžiku 1823 s dilatace činila 1,42 mm po odlití.

Grafické závislosti odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, obr. 3 – 25 až 3 – 29

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 25, odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. V časovém okamžiku 101 s byla stanovena dilatace 0,12 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,007 mm, která odpovídá časovému okamžiku 70 s po odlití. V časovém okamžiku 1129 s dilatace činila 1,24 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 26, odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. 419 °C. V časovém okamžiku 108 s byla stanovena dilatace 0,25 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,05 mm, která odpovídá časovému okamžiku 79 s po odlití. V časovém okamžiku 1364 s dilatace činila 1,24 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 27, odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. V časovém okamžiku 114 s byla stanovena dilatace 0,25 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídá časovému okamžiku 78 s po odlití. V časovém okamžiku 1667 s dilatace činila 1,13 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 28, odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. V časovém okamžiku 95 s byla stanovena dilatace 0,13 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,004 mm, která odpovídá časovému okamžiku 73 s po odlití. V časovém okamžiku 898 s dilatace činila 1,16 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 29, odlévání slitiny zinku $ZnAl_4Cu_3$, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. V časovém okamžiku 64 s byla stanovena dilatace 0,01 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,009 mm, která odpovídá časovému okamžiku 76 s po odlití. V časovém okamžiku 1511 s dilatace činila 1,17 mm po odlití.

Výsledné grafické závislosti, viz obr. 3 – 30 až 3 – 33

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 30, odlévání čistého hliníku, teplota krystalizace 660 °C . V časovém okamžiku 64 s byla stanovena dilatace 0,37 mm po odlití. Při teplotě 460 °C byla dilatace 0,07 mm, která odpovídala časovému okamžiku 90 s po odlití. V časovém okamžiku 1418 s dilatace činila 1,40 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 31, odlévání čistého zinku, teplota krystalizace 419 °C. V časovém okamžiku 109 s byla stanovena dilatace 0,25 mm po odlití. Při teplotě 420 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 44 s po odlití. V časovém okamžiku 683 s dilatace činila 1,01 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 32, odlévání slitiny hliníku AlSi7, krystalizace probíhala v intervalu teplot 618 až 560°C. V časovém okamžiku 97 s byla stanovena dilatace 0,16 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,02 mm, která odpovídal časovému okamžiku 73 s po odlití. V časovém okamžiku 1475 s dilatace činila 1,48 mm po odlití.

Z grafické závislosti, viz obr. 3 – 33, odlévání slitiny zinku ZnAl4Cu3, krystalizace probíhala v intervalu teplot 400 až 382 °C. V časovém okamžiku 97 s byla stanovena dilatace 0,12 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 74 s po odlití. V časovém okamžiku 899 s dilatace činila 1,16 mm po odlití.

Výpočet součinitele teplotní roztažnosti

Na základě naměřených hodnot z provedených experimentů volného smršťování odlitků byl dle vztahu:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

kde značí: Δl – změnu lineárního rozměru sledovaného tělesa [mm];

α - součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) [K⁻¹];

ΔT – změnu teplot [°C],

vypočítán součinitel teplotní smrštivosti α . $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} [K^{-1}]$, hodnota $l_0 = 157 \text{ mm}$.

Vypočítané hodnoty α jsou uvedeny v tabulkách 3.5 až 3.8.

Tabulka 3.5 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α získané na základě chladnutí odlitku z čistého hliníku, včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace

Číslo měření	Rozsah teplot [°C]	Dilatace u daných teplot [mm]	Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha [K^{-1}]$
1	660 až 680	0,2480	$7,9 \cdot 10^{-5}$
2	640 až 660	0,4592	$14,62 \cdot 10^{-5}$
3	620 až 640	0,4447	$14,16 \cdot 10^{-5}$
4	600 až 620	0,4049	$12,89 \cdot 10^{-5}$
5	580 až 600	0,3656	$11,64 \cdot 10^{-5}$
6	560 až 580	0,3327	$10,60 \cdot 10^{-5}$
7	540 až 560	0,2930	$9,33 \cdot 10^{-5}$
8	520 až 540	0,2411	$7,68 \cdot 10^{-5}$
9	500 až 520	0,1880	$5,99 \cdot 10^{-5}$
10	480 až 500	0,1391	$4,43 \cdot 10^{-5}$
11	460 až 480	0,0743	$2,37 \cdot 10^{-5}$
12	440 až 460	-0,0005	$1,59 \cdot 10^{-7}$
13	420 až 440	-0,0679	$2,16 \cdot 10^{-5}$
14	400 až 420	-0,1383	$4,40 \cdot 10^{-5}$
15	380 až 400	-0,2085	$6,64 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 3.6 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α získané na základě chladnutí odlitku ze slitiny AlSi7, včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace

Číslo měření	Teplota [°C]	Dilatace u daných teplot [mm]	Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha [K^{-1}]$
1	660 až 680	-0,0007	$2,23 \cdot 10^{-7}$
2	640 až 660	-0,0010	$3,18 \cdot 10^{-7}$
3	620 až 640	0,0072	$2,29 \cdot 10^{-6}$
4	600 až 620	0,0287	$9,14 \cdot 10^{-6}$
5	580 až 600	0,0336	$1,07 \cdot 10^{-5}$
6	560 až 580	0,0017	$5,41 \cdot 10^{-7}$
7	540 až 560	-0,0580	$1,85 \cdot 10^{-5}$
8	520 až 540	-0,0965	$3,07 \cdot 10^{-5}$
9	500 až 520	-0,1309	$4,17 \cdot 10^{-5}$
10	480 až 500	-0,1649	$5,25 \cdot 10^{-5}$
11	460 až 480	-0,2055	$6,54 \cdot 10^{-5}$
12	440 až 460	-0,2469	$7,86 \cdot 10^{-7}$
13	420 až 440	-0,2925	$9,32 \cdot 10^{-5}$
14	400 až 420	-0,3449	$1,10 \cdot 10^{-4}$
15	380 až 400	-0,4008	$1,28 \cdot 10^{-4}$

Tabulka 3.7 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α získané na základě chladnutí odlitku z čistého zinku, včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace

Číslo odměření	Teplota [°C]	Dilatace u daných teplot(mm)	Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]
1	470 až 480	-0,0030	$1,91 \cdot 10^{-6}$
2	460 až 470	-0,0039	$2,48 \cdot 10^{-6}$
3	450 až 460	-0,0041	$2,61 \cdot 10^{-6}$
4	440 až 450	-0,0038	$2,42 \cdot 10^{-6}$
5	430 až 440	-0,0031	$1,97 \cdot 10^{-6}$
6	420 až 430	-0,0019	$1,21 \cdot 10^{-6}$
7	410 až 420	-0,0017	$1,08 \cdot 10^{-6}$
8	400 až 410	-0,0100	$6,37 \cdot 10^{-6}$
9	390 až 400	-0,0269	$1,71 \cdot 10^{-6}$
10	380 až 390	-0,0486	$3,10 \cdot 10^{-5}$
11	370 až 380	-0,0643	$4,10 \cdot 10^{-5}$
12	360 až 370	-0,0863	$5,50 \cdot 10^{-7}$
13	350 až 360	-0,1124	$7,16 \cdot 10^{-5}$
14	340 až 350	-0,1337	$8,52 \cdot 10^{-5}$
15	330 až 340	-0,1498	$9,54 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 3.8 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α získané na základě chladnutí odlitku ze slitiny zinku ZnAl4Cu3, včetně teplotního rozsahu a hodnoty dilatace

Číslo odměření	Teplota [°C]	Dilatace u daných teplot(mm)	Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]
1	470 až 480	-0,0002	$1,27 \cdot 10^{-7}$
2	460 až 470	0,0002	$1,27 \cdot 10^{-7}$
3	450 až 460	0,0007	$4,46 \cdot 10^{-7}$
4	440 až 450	0,0010	$6,37 \cdot 10^{-7}$
5	430 až 440	0,0015	$9,55 \cdot 10^{-7}$
6	420 až 430	0,0021	$1,34 \cdot 10^{-6}$
7	410 až 420	0,0035	$2,23 \cdot 10^{-6}$
8	400 až 410	0,0062	$3,95 \cdot 10^{-6}$
9	390 až 400	0,0085	$5,41 \cdot 10^{-6}$
10	380 až 390	-0,0001	$6,37 \cdot 10^{-6}$
11	370 až 380	-0,0269	$1,71 \cdot 10^{-5}$
12	360 až 370	-0,0654	$4,17 \cdot 10^{-5}$
13	350 až 360	-0,1031	$6,57 \cdot 10^{-5}$
14	340 až 350	-0,1303	$8,30 \cdot 10^{-5}$
15	330 až 340	-0,1534	$9,77 \cdot 10^{-5}$

4. Diskuse výsledků

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o chování slitin zinku a hliníku při tuhnutí a chladnutí odlitků specifického tvaru „piškoty. Tento tvar kopíruje smršťování odlitků složitějších tvarů.

Pro tyto typy experimentů je nutné speciální zařízení, které dovoluje současné sledování dilatace a měření teploty v tepelné ose odlitku. Toto zařízení se skládá z měřicího rámu jehož součástí je dutina formy vytvořena kombinací pískové části (střední partie formy) a kovové části (okraje formy). Součástí tohoto zařízení je převodník a dilatometr s PC. Toto zařízení bylo sestaveno k řešení výzkumných prací, které se zabývají sledováním vlastností zinku, hliníku a jejich slitin.

V této souvislosti je též nutno konstatovat, že experimenty prováděné s tekutým kovem jsou velmi náročné, vyžadují perfektní ošetření taveniny (rafinaci a modifikaci) před odléváním, včetně stažení strusky i následné měření teploty před odléváním, aby byly zajištěny stejné podmínky experimentů. Na dodržení těchto zásad je odlévání do formy navrženo dle Bočvara a Sviderského (odlitek je poměrně malý a tuhne značnou rychlostí, obzvláště při odlévání slitin zinku).

Pokud porovnáváme oba typy odlévaných kovů, je možno říci, že hliník a slitiny hliníku se odlévají obtížněji, to souvisí s vysokou afinitou, kterou vytváří kyslík k hliníku za vzniku Al_2O_3 .

Z grafických závislostí, viz obr. 3 – 30 a 3 – 31 (odlívání čistého hliníku a zinku) je zřejmé, že teplota krystalizace hliníku je $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ a krystalizace čistého zinku je $419\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při tuhnutí čistého hliníku ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$), které končilo v časovém okamžiku 59 s po odlití byla stanovena dilatace 0,43 mm. Při tuhnutí čistého zinku, teplota krystalizace ($419\text{ }^{\circ}\text{C}$), které bylo ukončeno v časovém okamžiku 44 s a dilatace odpovídá hodnotě 0,01 mm. Sledováním dilatace čistého hliníku bylo zjištěno, že v časovém okamžiku 109 s po odlití byla dilatace 0,25 mm. V časovém okamžiku 1418 s po odlití byla dilatace čistého hliníku 1,40 mm. V časovém okamžiku 683 s po odlití činila dilatace čistého zinku 1,01 mm.

Celkem zajímavý se zdá být velmi orientační výpočet mezi poměrem teplot tání a poměrem dilatace těchto čistých kovů. Poměr mezi teplotami krystalizace obou materiálů je cca 1,57 a poměr mezi zjištěnými hodnotami výsledné dilatace je 1,39. V této souvislosti je třeba doplnit, že čistý hliník krystalizuje v kubické plošně středěné krystalické soustavě a zinek v soustavě hexagonální těsně uspořádané. Součinitel teplotní roztažnosti čistého hliníku činí $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ a součinitel teplotní roztažnosti čistého zinku $\alpha = 26,7 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$, poměr těchto hodnot je 1,12. Pokud se týká sledování lineárního smršťování odlitků při jejich chladnutí, tak na délku 1000 mm se čistý hliník smrští o 17,9 mm a čistý zinek o 16,1 mm. Poměr těchto hodnot činí 1,11. Pokud bychom tuto úvahu využili i při ověření naměřených hodnot smrštění odlitku při jeho tuhnutí, resp. chladnutí. Lze vypočítat, že sledovaný odlitek měl délku 157 mm by se měl smrstit o hodnotu 2,5 mm. A odlitek z čistého hliníku o 2,8 mm.

Z grafických závislostí, viz obr. 3 – 32 a 3 – 33 (odlévání slitiny hliníku a slitiny zinku) je zřejmé, že teplota krystalizace slitiny hliníku je v rozmezí teplot 618 až 560 °C a krystalizace slitiny zinku je v rozmezí teplot 400 až 382 °C. Při tuhnutí slitiny hliníku (618 až 560 °C), v časovém okamžiku 97 s byla stanovena dilatace 0,16 mm po odlití. Při teplotě 580 °C byla dilatace 0,02 mm, která odpovídala časovému okamžiku 73 s po odlití. V časovém okamžiku 1475 s dilatace činila 1,48 mm po odlití. Při tuhnutí slitiny zinku, teplota krystalizace je v rozmezí teplot (400 až 382 °C). V časovém okamžiku 97 s byla stanovena dilatace 0,12 mm po odlití. Při teplotě 385 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídala časovému okamžiku 74 s po odlití. V časovém okamžiku 899 s dilatace činila 1,16 mm po odlití. Celkem zajímavý se zdá být velmi orientační výpočet mezi poměrem teplot tání a poměrem dilatace těchto slitin. Poměr mezi teplotami, které jsem si zvolil je krystalizace obou materiálů cca 1,51 a poměr mezi zjištěnými hodnotami výsledné dilatace je 1,28. Takto lze orientačně porovnat slitinu hliníku a slitinu zinku.

Na součinitele α , které byly orientačně vypočítány na základě experimentálních výsledků, je třeba nahlížet pouze orientačně, neboť byla snaha rozšířit naše poznatky, které se týkají sledování tuhnutí a chladnutí odlitků z neželezných kovů. Pro získání více odpovídajících hodnot α je třeba provádět experimenty, které by vykazovaly přehledný výčet

teplot. Odlévání do formy dle Bočvara a Sviderského vedlo k rychlému tuhnutí a chladnutí odlitků a křivka teplot měla strmý charakter. Současně také by bylo asi vhodné provádět experimenty pro široký interval časů chladnutí odlitků, aby křivka chladnutí odlitku vykazovala i teploty okolí. Na základě provedených experimentů lze získat křivky časových závislostí dilatace a teploty. Tyto křivky svým charakterem se blíží skutečnosti. Je třeba podotknout, že je nutno vzít v úvahu vliv okolního prostředí, který zde hraje velkou roli. Pokud bychom chtěli ideálně odlévat dané odlitky museli bychom být uzavřeni v nějaké místnosti, kde by byla stálá teplota a nedocházelo by k těmto výkyvům. Proto i při provádění těchto experimentů byla sledována teplota okolí a bylo dbáno, aby experimenty probíhaly za pokud možno stejných podmínek.

5. Závěr

Diplomová práce se zabývá sledováním rozměrových změn při tuhnutí (chladnutí) odlitků, tvaru „piškoty“ ze slitin zinku a hliníku a čistých materiálů. Jedná se o čistý hliník a čistý zinek a slitiny Al Si7 a Zn Al4Cu3 .

Diplomovou práci jsem rozdělil do částí, rešeršní a experimentální. V rešeršní části je provedena charakteristika slévárenských slitin hliníku a zinku, včetně čistého hliníku a zinku. Jsou zde uvedeny fyzikální, slévárenské a mechanické vlastnosti slitin hliníku. Část experimentální je věnována popisu měřicího zařízení, které bylo navrženo a zkonstruováno pro tyto účely. Dále prováděných experimentů, při kterých byly sledovány rozměrové změny tuhacích a chladoucích odlitků. Z experimentálně naměřených hodnot dilatace byly vypočítány hodnoty součinitele teplotní smrštivosti chladoucích odlitků. V experimentální části diplomové práce bylo provedeno 20 experimentů měření tuhnutí (chladnutí) odlitků, (vždy pro každý materiál pět měření) za účelem zjištění časových závislostí teplot a dilatace (resp. smrštivosti). Dle těchto křivek jsem získal závislosti, jak se mění součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) v závislosti na teplotě. Měření bylo provedeno na dilatometrickém přístroji dle Bočvara a Sviderského. Odléval jsem odlitky tvaru „piškoty“ kde z těchto odlitků pomocí daného softwaru jsem získal příslušné grafické závislosti.

Dle provedených experimentů lze odvodit dané poznatky:

1. Navržené měřicí zařízení je především pro měření smršťování. Buď můžeme měřit volné smrštění, nebo můžeme provést předpětí danou pružinou. Je vhodný pro všechny druhy materiálů a hned vidíme jak se nám utváří křivka dle daného systému.
2. Porovnávání dilatace čtyř materiálů, jak se mění jejich křivky chladnutí. Moje snaha byla stanovit hodnoty s maximální přesností.
 - a) Pozoroval jsem, jak se mi mění křivky čistého hliníku a čistého zinku a dále slitiny zinku a slitiny hliníku..
 - b) Dále jsem si určil několik bodů (15) a v těchto bodech jsem dopočítal součinitele teplotní roztažnosti (smrštivosti) α .
 - c) Na závěr bych rád konstatoval, že diplomová práce díky možnostem, které mi poskytla katedra KSP TU v Liberci kde jsem na daném přístroji

provedl experimenty a došel tak k určitým výsledkům. Rozšíří problematiku okruhu těchto materiálů. Jak se jeví při tuhnutí a chladnutí. Tyto poznatky budou sloužit KSP TU v Liberci.

Porovnání hliníkových a zinkových slitin:

U čistého hliníku se při teplotě 460°C projevila dilatace 0,07 mm, která odpovídala časovému okamžiku 90 s po odlití.

U čistého zinku se při teplotě 420 °C projevila dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 44 s po odlití.

U slitiny hliníku se při teplotě 580 °C projevila dilatace 0,02 mm, která odpovídal časovému okamžiku 73 s po odlití.

U slitiny zinku se při teplotě 385 °C byla dilatace 0,01 mm, která odpovídal časovému okamžiku 74 s po odlití.

Zinek má mnohem lepší vlastnosti než hliník, jak po stránce mechanických vlastností tak především po stránce slévání. Ze zinku se vyrábějí nejsložitější součásti (karburátory motocyklové, automobilové), ale musíme připomenout, že se odlévají především součásti menších rozměrů a to díky tomu, že zinek je 2,4x těžší než hliník. Má bohužel velkou hmotnost.

Z důvodu, že se jednalo o základní výzkum, není zde v diplomové práci zahrnuto ekonomické hodnocení. Další experimenty navrhuji provádět s různou hodnotou teploty přehřátí odlévané taveniny. Nebo provádět experimenty s bržděným smrštěním.

Pro další výzkumné účely by bylo vhodné měřicí rám upravit, tak aby ocelové táhlo pro snímání změny lineárního rozměru bylo nahrazeno křemennou trubicí.

6. Použitá literatura

- [1] GRÍGEROVÁ, T., LUKÁČ, I., KOŘENÝ, R.: Zliévárnostvo neželezných kovov, 1.vydání, Bratislava/Praha 1988.
- [2] VILČKO, J., SLOVÁK, S.: Zliévárnská technológia, 1.vydání, Praha, 1987.
- [3] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie, 2.vydání, SNTL Praha, 1974.
- [4] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. [Skripta] KSP-FS, TU v Liberci, 2003.
- [5] NOVOTNÝ, J., ŠANOVEC, J., BEDNÁŘ, B., KREIBICH, V.: Technologie I [Skripta]. FS - ČVUT, Praha 1999.
- [6] ALAXIN, J. a kolektiv: Nauka o materiálu [Skripta]. FS- VŠST Liberec, 1987.
- [7] PTÁČEK, L., USTOHAL, V.: Slitiny zinku pro odlitky. Slévárnství, 2001, č.4, str. 203-208.
- [8] SEDLÁČEK, V.: Neželezné kovy a slitiny, 1. vydání, Praha, 1979.
- [9] PŘIBYL, J., VETIŠKA, C.: Teorie slévárnství. 1. vyd. Praha, 1963.
- [10] VOTOČEK, J.: Sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitin zinku. [Diplomová práce], KSP-FS, TU v Liberci, 2006.
- [11] SIRŮČEK, J.: Sledování rozměrových změn při tuhnutí odlitků ze slitin hliníku. [Diplomová práce], KSP-FS, TU v Liberci, 2005.
- [12] DALECKÝ, M.: Sledování vlivu podmínek ochlazování na krystalizaci odlitků ze slitin zinku. [Diplomová práce], KSP-FS, TU v Liberci, 2006.
- [13] www.zincdiecasting.umicore.com-internet
- [14] Zpracování neželezných kovů a jejich slitin -VUT Brno 1985

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60– školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nijak nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji– li diplomovou práci nebo poskytnu– li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo po mně požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 23. 5. 2008

Podpis:.....

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec (TUL) is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled my thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 23. 5. 2008

Signature:.....